

Б. М. Шустов, М. Е. Прохоров

# ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ ИЗ КОСМОСА

МОНОГРАФИЯ

Москва  
Знание-М  
2024

УДК 524.6-1/-7  
ББК 22.65  
Ш97

**Шустов, Борис Михайлович, Прохоров, Михаил Евгеньевич.**  
Ш97      Опасности и угрозы из космоса : монография / Б. М. Шустов,  
М. Е. Прохоров, — Москва : Знание-М, 2024. — 270 с.

ISBN: 978-5-00255-001-2

Это первая на русском языке книга, посвященная системному изложению проблем космических опасностей и угроз как естественных, так и антропогенных. Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся астрономией, вопросами экологии космоса и Земли, проблемами безопасности и даже выживания человечества. Эти проблемы описаны на доступном уровне.

Книга основана на курсах лекций, прочитанных авторами (членом-корр. РАН Б. М. Шустовым и д.ф.-м.н. М. Е. Прохоровым) в МГУ им. М. В. Ломоносова, и может использоваться как учебное пособие.

**УДК 524.6-1/-7  
ББК 22.65**

**ISBN 978-5-00255-001-2**

© Шустов Б. М., Прохоров М. Е., 2024  
© Знание-М, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Опасности, угрозы, риски – неизбежные факторы цивилизации .....	7
1.2. Виды и краткая характеристика космических опасностей .....	10
<i>Литература к разделу.....</i>	<i>13</i>
<b>Часть I. ПРИРОДНЫЕ (ЕСТЕСТВЕННЫЕ) ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ.....</b>	<b>14</b>
<b>2. АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ .....</b>	<b>15</b>
2.1. Общая характеристика проблемы АКО.....	15
2.1.1. Основные понятия и термины.....	15
2.1.2. Частота и последствия столкновений малых тел с Землёй.....	17
2.1.3. Комплексный характер проблемы АКО и её составляющие .....	21
2.2. Объекты, сближающиеся с Землёй (ОСЗ) – как источники АКО... 23	
2.2.1. Статистика населения ОСЗ: модели и наблюдения.....	23
2.2.2. Распределения наблюдаемых АСЗ по орбитальным и физическим параметрам .....	26
2.2.3. Другие распределения АСЗ, существенные для построения программ обнаружения и мониторинга АСЗ.....	33
2.2.4. Источники и механизмы воспроизводства населения ОСЗ.....	38
2.3. Методы и средства обнаружения и мониторинга ОСЗ.....	40
2.3.1. О выборе параметров системы обнаружения .....	40
2.3.2. Телескопы, используемые для обнаружения и мониторинга ОСЗ	44
2.3.3. Проблема обнаружения ОСЗ, сближающихся с Землёй со стороны Солнца (с дневного неба) .....	51
2.4. Об оценке рисков, связанных с АКО.....	53
2.4.1. Оценка вероятности столкновения.....	54
2.4.2. Оценка последствий возможного столкновения.....	59
2.4.3. Туринская и Палермская шкалы для оценивания угрозы столкновения Земли с астероидами и кометами .....	64
2.5. Методы парирования угрозы столкновений .....	67

2.5.1. Об изменении орбиты (уводе) опасного небесного тела .....	69
2.5.2. О дезинтеграции (разрушении) опасного небесного тела .....	69
2.6. Над чем работать .....	70
<i>Литература к разделу</i> .....	71
<b>3. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА .....</b>	<b>74</b>
3.1. Солнце и космическая погода.....	74
3.2. Воздействие космической погоды на людей и земные технологии 75	
3.3. Сверхмощные вспышки и сверхсильные геомагнитные бури .....	78
3.3.1. Классификация вспышек на Солнце .....	78
3.3.2. Современная статистика вспышек на Солнце. ....	80
3.3.3. Сверхмощные вспышки на Солнце за последние 200 лет.....	81
3.3.4. Вспышки на Солнце в далеком прошлом .....	85
3.3.5. Предельная энергия солнечной вспышки: теория .....	87
3.4. Супервспышки и их возможные последствия .....	88
3.4.1. Что такое супервспышки?.....	88
3.4.2. Супервспышки на звёздах.....	89
3.4.3. Последствия супервспышки на Солнце.....	94
3.5. Некоторые космические эксперименты по наблюдению активности Солнца.....	95
3.6. Организации, занимающиеся космической погодой .....	97
3.7. Над чем работать .....	98
<i>Литература к разделу</i> .....	99
<b>4. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ.....</b>	<b>101</b>
4.1. Пролёт звезды через Солнечную систему .....	101
4.2. Пересечение Солнечной системой диска Галактики .....	113
4.3. Близкий взрыв сверхновой.....	115
4.3.1. Общие сведения о сверхновых.....	115
4.3.2. Опасные явления, связанные со сверхновыми .....	118
4.3.3. Воздействие близких Сверхновых на Землю.....	119
4.3.4. Об опасных сверхновых.....	130
4.4. Близкий гамма-всплеск.....	134
4.5. Попадание Солнца в плотное облако межзвёздного газа.....	139
4.6. Экзотика .....	141
<i>Литература к разделу</i> .....	144
<b>Часть II. АНТРОПОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ .....</b>	<b>145</b>
<b>5. КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР .....</b>	<b>146</b>



5.1. Общие сведения о космическом мусоре .....	146
5.1.1. Источники и классификация КМ.....	147
5.1.2. Населенность околоземного космического пространства объектами КМ.....	149
5.1.3. Факторы риска, обусловленные КМ и методы парирования.....	162
5.2. Средства обнаружения и мониторинга объектов космического мусора .....	165
5.3. Модели эволюции населения КМ.....	170
5.4. Особенности движения объектов КМ техногенного и естественного происхождения .....	172
5.5. Существующие и перспективные методы очистки околоземного космического пространства.....	177
5.6. Внутрirosсийская и международная кооперация по проблеме КМ. Правовые вопросы .....	182
5.7. Над чем работать .....	183
<i>Литература к разделу</i> .....	184
<b>6. ПРОБЛЕМА ПЛАНЕТАРНОЙ БИОЗАЩИТЫ.....</b>	<b>186</b>
6.1. Факторы риска, связанные с биологическим заражением .....	188
6.2. Рекомендации по планетарному карантину .....	192
6.3. Методы реализации требований планетарного карантина .....	194
<i>Литература к разделу</i> .....	199
<b>7. ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ (КЛИМАТИЧЕСКАЯ КАТАСТРОФА).....</b>	<b>201</b>
7.1. Глобальное потепление: основные факты.....	201
7.2. Энергетический баланс Земли. Дисбаланс на поверхности Земли 207	
7.3. Парниковый эффект на Земле сегодня.....	211
7.3.1. Планета без атмосферы и эффективная температура поверхности 211	
7.3.2. Задача о садовом парнике .....	213
7.3.3. Парниковый эффект на Земле .....	217
7.3.4. Антипарниковый эффект .....	219
7.4. Близкие последствия глобального потепления.....	220
7.4.1. Воздействия изменения климата .....	220
7.4.2. Повышение уровня океанов .....	224
7.4.3. Остановка Гольфстрима.....	226
7.5. Климатические катастрофы .....	229

7.5.1. Влажная климатическая катастрофа .....	229
7.5.2. Углекислотно-водная парниковая катастрофа .....	231
7.5.3. Что происходит с водой после парниковой катастрофы.....	237
7.6. Парниковый эффект и эволюция климата на Венере и Марсе.....	237
7.6.1. Парниковый эффект на Венере.....	238
7.6.2. Парниковый эффект на Марсе .....	239
7.7. Долговременный прогноз развития глобального потепления на Земле .....	241
7.8. Организации, занимающиеся проблемой глобального потепления 243	
7.9. Противодействие .....	244
7.9.1. Ограничение выбросов парниковых газов в атмосферу .....	244
7.9.2. Геоинженерия .....	246
7.9.3. Космический солнечный зонтик для Земли.....	247
7.10. Над чем работать .....	248
<i>Литература к разделу</i> .....	249
<b>8. ПРОБЛЕМА ТЕМНОГО И СПОКОЙНОГО НЕБА .....</b>	<b>250</b>
8.1. Общие сведения.....	250
8.2. Проблема искусственного освещения в ночное время.....	251
8.3. Проблема влияния мега-созвездий ИСЗ на астрономические наблюдения .....	255
8.3.1. Оптический диапазон .....	257
8.3.2. Радиодиапазон .....	267
8.4. Методы снижения остроты проблемы .....	270
<i>Литература к разделу</i> .....	272
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>273</b>

# **1. ВВЕДЕНИЕ**

## **1.1. Опасности, угрозы, риски – неизбежные факторы цивилизации**

Развитие человеческой цивилизации сопровождается углублением понимания и мира, в котором мы живём, и самого человека. При этом выявляются новые, ранее неизвестные опасности (угрозы). К ним можно отнести и космические опасности (угрозы).

Мы используем два термина – «угроза» и «опасность». По сути, это близкие, но не тождественные понятия. Опасность – это неблагоприятный фактор природного, техногенного или социального происхождения. Опасность имеет потенциальный (возможный) характер. Угроза же – это опасность более конкретная по времени и месту. Примеры – существует опасность (вообще) для космической деятельности, связанная с космическим мусором, и время от времени появляются, например, определённые угрозы столкновения международной космической станции (МКС) с конкретными объектами космического мусора (КМ). Мы используем и тот и другой термины, не очень строго разделяя их по значению, если это не влияет на понимание текста.

Для дальнейшего изложения нужно также определить понятие риска. Риск – это количественная оценка, определяемая как сочетание вероятности реализации данной угрозы и тяжести последствий такой реализации. Эта количественная оценка лежит в основе механизма принятия решения. Пример – при вероятности столкновения МКС выше 0.0001 с достаточно крупным объектом принимается решение о манёвре уклонения.

Люди по-разному относятся к космическим опасностям. Довольно значительная часть населения просто не обладает достаточной степенью развития критического мышления и верит разнообразным ужастикам, распространяемым в различных СМИ (как правило, для того, чтобы привлечь внимание, ведь внимание в нашем мире – это коммерческий фактор). Немало людей, которые относятся к проблемам космических опасностей (по крайней мере, к части этих проблем) со скептицизмом. Не то чтобы сомневаются в реальности таких опасностей, но и не воспринимают их

как серьёзную проблему, либо считают, что в нашей жизни есть много гораздо других, более серьёзных и насущных проблем (что, конечно, справедливо), которые нужно решать в том числе на государственном уровне, а космические опасности – дело писателей, сценаристов и учёных. В определённом смысле это верно, т. е. космические опасности – это, несомненно, предмет науки.

Напомним, что науку, как сферу человеческой деятельности, которая направлена на добывание и осмысление знания, принято по направленности этой деятельности делить на фундаментальную и прикладную. Если с представлениями, о том, что называть прикладной наукой, особых разночтений нет, то о том, что такое фундаментальная наука, можно встретить весьма различные мнения. Наиболее характерны определения типа «фундаментальная наука – это наука, имеющая своей целью создание теоретических концепций и моделей, практическая применимость которых неочевидна».

Вопрос о прикладном или фундаментальном характере исследований – не просто дань систематике. В зависимости от того, как классифицируются научные исследования, во многих странах определяется канал поддержки этих исследований. Обычно фундаментальные исследования поддерживаются за общегосударственный счёт. В финансировании же прикладных исследований главная роль отводится будущим потребителям результатов этих исследований (как государственным органам, так и частным компаниям). Поэтому важно определиться с тем, какая это наука – изучение космических опасностей – прикладная или фундаментальная?

Прежде чем ответить на этот вопрос, изложим своё мнение по поводу общего назначения науки. Человек – часть природы, но он уже давно не подчиняется этим законам и даже нарушает многие из них. Для всех остальных живых существ такое нарушение грозило бы экстинкцией, т. е. вымиранием. Но мы, люди, – особенные существа, мы изобрели такой мощный инструмент как наука. Основное предназначение науки – поиск путей устойчивого существования и развития (даже процветания) вида «*homo sapiens*» в сложном и непрерывно меняющемся мире. В этом смысле вся

наука, во всех её самых «фундаментальных» аспектах имеет «прикладной» характер.

Что касается исследований по тематике космических опасностей, то важнейшая «фундаментальная» задача – это глубокое изучение факторов и процессов, составляющих суть космических опасностей, их значения для устойчивого развития человечества, а важнейшая практическая задача – это своевременное выявление космических угроз, надёжная оценка рисков, связанных с этими угрозами, и разработка методов противодействия.

В последние годы космическим угрозам (опасностям) в мире уделяется всё возрастающее внимание. В ряде стран ведутся большие национальные программы по изучению и парированию таких угроз. В этой книге – обзоре, имеющем вводный характер, рассмотрено современное состояние проблемы космических угроз. Особое внимание уделено тем видам угроз, которые имеют выраженную практическую составляющую и в решении которых роль астрономии весьма значительна. Актуальность тематики особенно возрастает в связи с разработкой в России проекта «Млечный путь» по созданию системы изучения и парирования космических угроз в части безопасности космической деятельности<sup>1</sup>.

Мы считаем, что, с одной стороны, необходимо привлечь внимание ученых (физиков, астрономов, геофизиков, биологов, экспертов по социальным наукам и т.д.), особенно молодых, к осуществлению этого важного проекта, а с другой – дать возможность всем, интересующимся наукой (мы уверены таких людей очень много), ознакомиться с современным уровнем исследований в этой важной и интересной области знаний. Поэтому книга написана в почти научно-популярном стиле, формул и ссылок в ней немного (они приведены, только если это совершенно необходимо), некоторые рисунки просто взяты из Интернета, но все существенные моменты сопровождается ссылками на научные источники информации. Для специалистов это может быть полезным справочным подспорьем. Поскольку акцент в книге сделан на астрономические аспекты, т. к. оба автора – астрономы, книга может быть

---

<sup>1</sup> <https://www.roscosmos.ru/39521/> - дата обращения 28.07.2024.

полезной и как учебное пособие для обучающихся по специальности, которая в недавно введенной номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, имеет название 1.3.1. «Физика космоса, астрономия».

## 1.2. Виды и краткая характеристика космических опасностей

Наиболее значимыми космическими опасностями считаются следующие [1.1]:

1. ***Космический мусор (КМ)*** – техногенное засорение околоземного космического пространства (ОКП<sup>2</sup>), представляющее опасность сокращения или даже прекращения космической деятельности человечества. Дополнительную опасность представляет и метеорное вещество в ОКП.
2. ***Космическая погода*** – плохо прогнозируемые изменения активности Солнца, вызывающие резкие изменения в ОКП и представляющие опасность серьёзных потерь, прежде всего, в сфере производственной деятельности (в энергетике, связи и др.).
3. ***Проблема изменения климата (Глобальная климатическая катастрофа, ГКК)*** – быстрое изменение климата на Земле, которое может принять катастрофические для человечества масштабы (синдром Венеры).
4. ***Астероидно-кометная опасность (АКО)*** – опасность, обусловленная возможными столкновениями Земли с малыми те-

---

2 Дидактически правильно перед изложением какой-либо темы напоминать смысл (семантику и/или количественные характеристики) используемых терминов, особенно тех, которые хотя и встречаются часто, и считаются общепринятыми и всем известными, но используются в разном значении. Околоземное космическое пространство (ОКП) – как раз один из таких терминов. Поскольку понятие ОКП разными группами ученых и технических специалистов определяется по-разному, в дальнейшем для определённости мы будем использовать астрономическое (небесно-механическое) определение ОКП как сферы Хилла для Земли. Радиус сферы Хилла составляет 1.5 млн км.

лами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением крупного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации.

5. **Биологическая угроза** – обусловлена как опасностью занесения на Землю внеземных (или земных, но изменившихся из-за пребывания в космосе) форм жизни, так и выносом человеком различных организмов в космос с возможным «заражением» земными формами жизни других тел Солнечной системы.
6. **Астрофизические опасности** – наиболее экзотический, но, тем не менее, реальный вид космических опасностей. Его связывают с возможностью различных катаклизмов связанных с факторами и событиями, происходящими за пределами Солнечной системы.
7. **Проблема тёмного и спокойного неба (ТСН)** – получившая в самые последние годы большое внимание в мире (особенно в астрономическом) проблема влияния быстрого нарастания искусственного освещения в ночное время и запуска мега-созвездий спутников в ОКП на земную биоту и на перспективы астрономических наблюдений с поверхности Земли и из околоземного космического пространства.

Мы не обсуждаем здесь угрозы военного характера. Это очень важная (даже важнейшая в наше беспокойное время) тема, но она требует отдельного рассмотрения.

Часть космических опасностей из приведенного списка имеет независимый от деятельности человечества (т. е. природный) характер. Это проблемы 2, 4 и 6. Они описаны в первой части книги. Очевидно, что проблема 7 полностью создана нами самими. Проблемы 1, 3 и 5 имеют как техногенное (особенно проблема 1), так и природное происхождение. Описания этих проблем сгруппированы во второй части книги.

Все перечисленные опасности глобальны, но значимость их, разумеется, неодинакова. Расположение проблем в списке выражает представления авторов о «ранжировании» проблем по актуальности для человечества в настоящее время. На протяжении вто-

рой половины 20-го и начала 21-го столетий человечество испытало серьёзные проявления космических опасностей типов 1, 2, 4. Проблема 3 начала особенно отчётливо проявляться как тенденция в последние годы. Актуальность проблем 1–4 подчёркивается большим вниманием, которое ведущие страны и крупные международные организации (прежде всего ООН) уделяют этим проблемам. В самое последнее время на столь высокий уровень вышла и проблема 7.

Актуальность «номер один» проблемы КМ, обусловлена тем, что она проявляется ежедневно и, пожалуй, наиболее часто требует принятия решений в сфере космической деятельности. По масштабам последствий наиболее катастрофической, хотя и относительно редко реализуемой, считается опасность 4 (т. е. АКО). Реальных проявлений биологической опасности пока не наблюдалось, хотя эта опасность с развитием космической деятельности становится более существенной. Временная шкала астрофизических опасностей, которые также могут привести к глобальным последствиям, – (многие) миллионы лет, и с практической точки зрения они не представляют интереса, но зато вызывают большой интерес у учёных и, отчасти, у любителей науки. Проблема ТСН вызывает растущее внимание, в основном, со стороны астрономов (хотя и не только их – см. главу 8), и поэтому она включена в книгу.

В некоторые главы включены разделы, в которых перечислены наиболее перспективные или даже совсем нерешённые задачи, которые, по мнению авторов, могут привлечь внимание исследователей-астрономов, особенно молодых.

Авторы при подборе материала в значительной степени опирались на опыт чтения курсов лекций «Космические угрозы» (Б.М. Шустов) и «Астероидно-кометная опасность» и «Космические опасности» (М.Е. Прохоров) в МГУ им. М.В. Ломоносова.

В соответствии со своими научными предпочтениями авторы разделили ответственность за написание глав следующим образом: Б.М. Шустов – главы 1, 2, 5, 6, 8, М.Е. Прохоров – главы 3, 4, 7.



### *Литература к разделу*

- 1.1 Шустов Б.М., О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестник Российской академии наук, Т. 89, № 8, с. 777–799, 2019.
- 1.2 Frontiers of Space Risk: natural cosmic hazards & societal challenges, by R.J. Wilman and C.J. Newman. CRC Press, 2019.

**Часть I. ПРИРОДНЫЕ (ЕСТЕСТВЕННЫЕ)  
ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ**

## **2. АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ**

Во Введении дано формальное определение астероидно-кометной опасности (АКО) – как опасности, обусловленной возможными столкновениями Земли с малыми небесными телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением крупного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения цивилизации. В последние три десятилетия проблема АКО стала весьма «популярной». Ведущие страны уделяют проблеме обнаружения и определения свойств опасных небесных тел (ОНТ), а также способам парирования такой угрозы большое внимание. Уже более 20 лет проблема АКО стоит в повестке ежегодных заседаний Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (COPUOS) и его подкомитетов. На разработку и реализацию методов изучения и парирования угроз, связанных с АКО, в мире выделяются всё возрастающие средства. Эта сфера знаний и практической деятельности быстро меняется. В этой книге многие сведения даны что называется *update*. Тем не менее, мы полагаем, что читателю будут полезно ознакомиться и с базовыми сведениями, изложенными, например, в [2.1], где подробно описан астрономический «фундамент», и в [2.2], где упор сделан на практические стороны проблемы.

### **2.1. Общая характеристика проблемы АКО**

#### **2.1.1. Основные понятия и термины**

В определении АКО использовано понятие малые тела Солнечной системы. В резолюции В5 Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) приведены определения понятий «планета» и «карликовая планета», а также специфицировано понятие «малые тела Солнечной системы». Это объекты, которые по своим характеристикам не могут быть отнесены ни к

карликовым планетам, ни к планетам или их спутникам. Разъяснено, что к этой группе относятся большинство астероидов Солнечной системы, большинство транснептуновых объектов, кометы и другие тела. К малым телам Солнечной системы также относятся метеороиды и межпланетная пыль. До последних лет ситуация с классификацией малых небесных тел (МНТ), была довольно неопределённой, примерно такой же расплывчатой, как и с определением понятия ОКП (см. раздел 1.2). Только сравнительно недавно объекты, составляющие понятие МНТ, получили определенную классификацию по размеру, рекомендованную для общего использования. По современной классификации (согласно решению комиссии F1 Международного астрономического союза за 2017 г.):

- **астероиды и ядра комет** – твердые межпланетные объекты размером более 1 м;
- **метеороиды** – твердые объекты размером примерно от 30 мкм до 1 м, движущиеся в межпланетном пространстве;
- **межпланетная пыль** – твердые межпланетные объекты размером до 30 мкм.

Метеороиды и даже межпланетная пыль являются факторами риска для безопасности космической деятельности, но ясно, что для населения Земли и наземной инфраструктуры человеческой цивилизации большую опасность представляют лишь достаточно крупные тела, вероятность столкновения с которыми значительна. В некоторых публикациях их называют опасными небесными телами (ОНТ). Это общее определение в практическом плане недостаточно конкретно. Существует общепринятые количественные определения некоторых классов ОНТ. Так под **объектами, сближающимися с Землёй** (ОСЗ, в англоязычной литературе NEO – Near Earth Objects), понимают астероиды (астероиды, сближающиеся с Землёй – АСЗ, в англоязычной литературе NEAs) и кометы (КСЗ, NECs), с орбитами, у которых перигелийное расстояние  $q < 1.3$  а.е. Из их числа выделяют **потенциально опасные объекты** (ПОО, в англоязычной литературе PHO – Potentially Hazardous Objects, в том числе PHA – Potentially Hazardous Asteroids), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до

минимального расстояния (MOID, minimum orbit intersection distance), не превышающего 0.05 а.е., т. е. 7.5 млн. км. Основанием для того, чтобы считать такие тела опасными, является то обстоятельство, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами малого тела и Земли в обозримом будущем (100–200 лет) под влиянием планетных возмущений, а также то, что 0.05 а.е. – характерный масштаб области неопределённости орбиты малого тела (при прогнозировании примерно на сто лет вперед) вследствие неточного знания параметров движения тела в настоящую эпоху. К этому (динамическому) определению ПОО в мировой литературе добавляли требование, чтобы абсолютная астероидная звёздная величина  $H$  тела не превосходила 22.0 (см. <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>). **Абсолютной звёздной величиной  $H$**  объекта называется видимая звёздная величина, которую зафиксировал бы наблюдатель, если бы объект находился и от него, и от Солнца на расстоянии в одну астрономическую единицу, при этом угол фазы (угол Солнце-объект-наблюдатель) был бы нулевым. Эта величина представляет собой некую полезную абстракцию, поскольку такой конфигурации никогда быть не может. Для некоторой (средней для астероидов) величины альбедо  $A = 0.15$  диаметр  $D$  сферического тела, имеющего  $H = 22$ , оценивается примерно в 140 м по формуле

$$D(\text{км}) = 10^{3.1236 - 0.5 \log_{10}(A) - 0.2 H}, \quad (2.1)$$

В современных условиях критическая граница размеров пересматривается и со 140 м снижается, как минимум, до 50 м (размер Тунгусского тела), а в самое последнее время (см. [2.3]) даже до 10 м (практический нижний предел, подтвержденный Челябинским событием). Для оценки «на вскидку» полезно знать, что при  $A = 0.15$  тело размером 10 м имеет  $H \cong 28$ , а тело размером 1 км  $H \cong 18$ .

### 2.1.2. Частота и последствия столкновений малых тел с Землёй

В геологической истории Земли сохранилось много свиде-

тельств катастроф, вызванных падением на Землю крупных и очень крупных (размером более 1 км) тел. Падение таких космических тел приводит к выделению колоссальной энергии. В результате на поверхности планеты образуются кратеры, диаметр которых в 15–20 превышают размеры упавшего тела. На Земле, на суше и на дне океана обнаружено около 200 крупных кратеров – следов подобных катастроф. Некоторые из них превышают 200 км в диаметре. Крупнейший изученный ударный кратер на Земле, расположен в 120 километрах от Йоханнесбурга (ЮАР). Диаметр этого кратера Вредефорт составляет 250–300 километров, возраст – около 2 млрд лет

(см. <http://www.hartrao.ac.za/other/vredefort/vredefort.html>). Знаменитый кратер Чиксулуб в Мексике (диаметр 180 км) образовался при падении 10 километрового тела примерно 65 млн лет тому назад. Считается принятым, хотя и не единогласно, что это событие послужило причиной массового вымирания живых существ на Земле, в том числе полного вымирания динозавров и ознаменовало переход от мелового периода мезозойской эры к третичному периоду кайнозоя.

Конечно, большая часть космических тел, сталкивающихся с Землёй, падает в моря и океаны. К настоящему времени обнаружено около 20 кратеров, образовавшихся при падении тел в море. Причина малочисленности подводных кратеров связана как с относительной молодостью морского дна, так и с его малой исследованностью. Большая часть некогда образовавшихся ударных кратеров и на суше, и на морском дне, исчезла вследствие различных эрозийных процессов. На поверхности Луны и других планет, спутников планет и астероидов, где интенсивность этих процессов мала, наблюдается огромное количество ударных кратеров, которые представляют собой исторические записи о последствиях столкновений в далёком и не очень далёком прошлом. Эти записи позволили сделать очень важный вывод – в последние пару-тройку миллиардов лет темп бомбардировки Луны (а значит и Земли) существенно не менялся, т. е. бомбардировка малыми небесными телами (конкретнее, ОСЗ) продолжится.

Одна из важных особенностей динамической эволюции насе-

ления ОСЗ состоит в том, что численность населения ОСЗ на протяжении последних 2–3 миллиардов лет оставалась почти неизменной, хотя динамическая шкала существования текущего населения ОСЗ относительно коротка (см. далее в разделе 2.2.4). О численности ОСЗ в предыдущие эпохи можно судить, анализируя изменение со временем темпа ударного кратерообразования на безатмосферных телах Солнечной системы. Наиболее удобный для изучения естественный «журнал» с записями столкновений за большой интервал времени (миллиарды лет) – это поверхность Луны. Отсутствие атмосферы, воды, тектонической активности способствует сохранности этого журнала, а его относительная близость к наблюдателю – возможности проводить детальные исследования. Для Луны согласно работе [2.4] история бомбардировки описывается формулой

$$N(1) = 5.44 \cdot 10^{-14} (e^{6.93T} - 1) + 8.38 \cdot 10^{-4}t, \quad (2.2)$$

где  $N(1)$  – число кратеров размером более 1 км, образовавшихся на поверхности Луны в пересчете на площадь 1 км<sup>2</sup> за всё время. Время  $t$  задается в миллиардах лет от нашей эпохи в прошлое. Производная по времени от соотношения (2.2) дает оценку темпа бомбардировки  $\phi$ . График зависимости  $\phi$  от  $t$  приведен на рис. 2.1.

Важный вывод – последние ~3 млрд. лет темп бомбардировки Луны, а значит и Земли, телами, представляющими опасность (за образование ударных кратеров размером более 1 км, ответственные тела размером более 50 м) менялся мало, хотя ~4 миллиарда лет назад темп бомбардировки был на несколько порядков выше. Второй вывод – тела размером ~50 м сталкиваются с Землёй в среднем один раз примерно в тысячу лет. Конечно, полученные выше оценки дают лишь оценку некоторого усредненного темпа бомбардировки. В течение миллиардов лет различные события могли вызывать (временные) изменения этого темпа (см. обсуждение в [2.5]).

Яркими примерами того, что падение относительно крупных тел на планеты Солнечной системы – процесс далеко не закончившийся, являются падение в 1994 г. кометы Шумейкеров-Леви 9 на

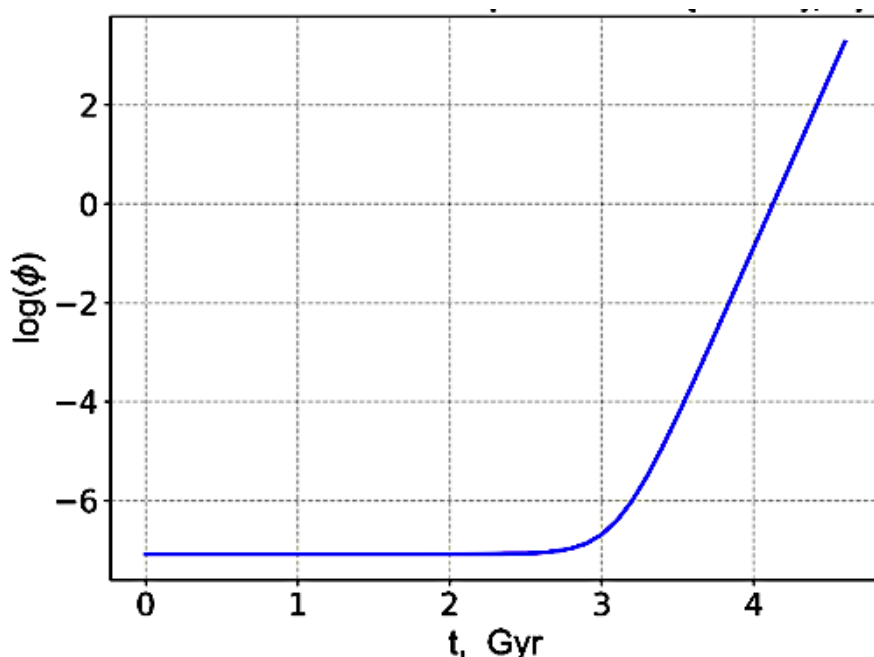


Рис. 2.1. Эволюция темпа образования ударных кратеров ( $> 1$  км) на Луне.

Юпитер и, конечно, Тунгусская катастрофа, случившаяся 30 июня 1908 г. в труднодоступном и весьма малонаселённом районе Сибири. Мощный взрыв на высоте примерно 6–8 км привёл к вывалу леса (примерно 80 миллионов деревьев) на территории более 2 тысяч квадратных километров. Энергия взрыва была примерно 15 мегатонн тринитротолуола (ТНТ), т. е. в тысячу раз больше, чем энергия взрыва ядерного устройства над Хиросимой. Никаких метеоритов, т. е. остатков космического тела, найдено не было. Изучение этого феномена привело большинство исследователей к убеждению, что Земля столкнулась с небольшой (размером 40–50 м) кометой, состоящей в основном из льдов. Впрочем, это мог быть и рыхлый каменный астероид, тоже полностью испарившийся. Именно поэтому пока не удалось отыскать остатки Тунгусского тела. На нашей недавней памяти 15 февраля 2013 г. произошло известное Челябинское событие [2.6], также проиллюстрировавшее реальность угроз, связанных с АКО. Пострадало более 1600 человек, материальный ущерб превысил 1 млрд руб. и это ещё очень благоприятный исход. Если бы это небесное тело вошло в атмосферу ближе к вертикали, последствия были бы чудовищными.



Частота и последствия столкновений сильно зависят от массы сталкивающегося с Землёй тела. От скорости тоже, но массы ОСЗ варьируются в гораздо больших пределах, чем скорости (см. раздел 2.2.2). В табл. 2.1 приведены современные данные о средней частоте и результатах столкновений тел различных размеров с Землёй.

Ответ на вопрос, «какие столкновения надо считать наиболее опасными?» в общем плане очевиден. Понятно, что столкновения с частотой раз в миллионы или миллиарды лет практического интереса не имеют, но являются очень интересным объектом фундаментальных исследований. А вот столкновения с достаточно крупными (размером от 10 до 300 м) телами, которые могут нанести значительный ущерб, и происходящие достаточно часто на шкале времени короче 100–200 тысяч лет (примерное время существования вида *homo sapiens*), находятся в зоне внимания науки, занимающейся проблемой АКО.

### 2.1.3. Комплексный характер проблемы АКО и её составляющие

Отметим следующие общие характеристики проблемы АКО:

- практически нет верхнего предела опасного воздействия;
- как показывают оценки, усреднённый уровень угрозы мал, но при угрозе конкретного события (столкновения), оно может оказаться главным не только для отдельной страны, но и для всего человечества. Пример: скромное по астрономическим меркам Челябинское событие 15 февраля 2013 г. стало главным на тот момент событием мирового масштаба.
- опасность имеет глобальный характер;
- угроза столкновений с крупными небесными телами может быть достаточно уверенно прогнозируема, при условии, что будут решены задачи заблаговременного обнаружения и оценки риска.

По своей структуре проблема АКО – комплексная. Выделяют три её основные составляющие (аналогично с проблемой космического мусора):

Таблица 2.1. Средняя частота и результаты столкновений малых тел различных размеров с Землёй.

Объект	Размер $D$	Средний интервал между столкновениями (годы)	Размер кратера (км)	Результат столкновения с Землёй
Пылинка	$D < 0.03$ см	Непрерывно	–	Сгорает, оседает
Метеороид	$0.03 \text{ см} < D < 1 \text{ м}$	Часто	–	Сгорает
Астероид Комета	1 м	~0.1	–	Сгорают, малая доля долетает до поверхности
	10 м	~ 10	0.2 нет	Локальная катастрофа
	100 м	~ 5 тыс.	2	Региональная катастрофа
	1 км	1 млн	20	Глобальная катастрофа
	10 км	100 млн	200	Конец цивилизации

1. проблема обнаружения (выявления) всех опасных небесных тел и определения их свойств;
2. проблема оценки риска;
3. проблема противодействия и уменьшения ущерба.

Очевидно, что проблема обнаружения является первоочередной.

## 2.2. Объекты, сближающиеся с Землёй (ОСЗ) – как источники АКО

### 2.2.1. Статистика населения ОСЗ: модели и наблюдения

Как видно из предыдущего раздела «носителями» АКО являются ОСЗ, т. е. сближающиеся с Землёй астероиды и ядра комет размером более 10 м. Естественно, что для серьезного изучения и парирования АКО нужно иметь ответы на несколько важных вопросов – сколько таких тел в Солнечной системе, каковы их свойства, насколько точно мы можем прогнозировать их движение, в том числе предсказывать возможные столкновения с Землёй и как подготовить эффективную систему обнаружения и парирования этого вида космических угроз.

В разделе 2.1. отмечалось, что первоочередной задачей является решение проблемы обнаружения опасных тел. В современной трактовке она рассматривается как задача оперативного и массового (то есть не ниже некоторого порога полноты, обычно 90%) выявления опасных тел. Регулярные наблюдения (мониторинг, в англоязычной литературе также используют термин follow up) как найденных в программах обнаружения, так и известных ранее опасных объектов, должны обеспечить уточнение их орбит и максимально полное исследование физических свойств тел, вызывающих повышенное внимание. Это важно для надежной оценки вероятности и последствия столкновения. Как мы увидим ниже, несмотря на быстрый прогресс в наблюдениях проблема остается очень далекой от решения.

Количество обнаруженных ОСЗ принято иллюстрировать хорошо известной и постоянно обновляющейся диаграммой (см. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html> ). На рис. 2.2, взятом с этого сайта, показан рост числа обнаруженных АСЗ за период 1980–2024 гг. На врезке на рис. 2.2 показано количество астероидов и комет, сближающихся с Землёй, в том числе потенциально опасных. Очевидно, что доля комет в общем числе ОСЗ очень мала, и статистка обнаруженных АСЗ хорошо представляет полную статистику ОСЗ. Из рис. 2.2 видно, что в последние 10–20 лет кривая обнаружения, соответствующая астероидам размером бо-

лее 1 км, вышла на насыщение (пологий участок). Считается, что почти достигнута полнота обнаружения. Для более мелких АСЗ полнота обнаружения сильно уменьшается с уменьшением размера АСЗ. Это проиллюстрировано в табл. 2.2.

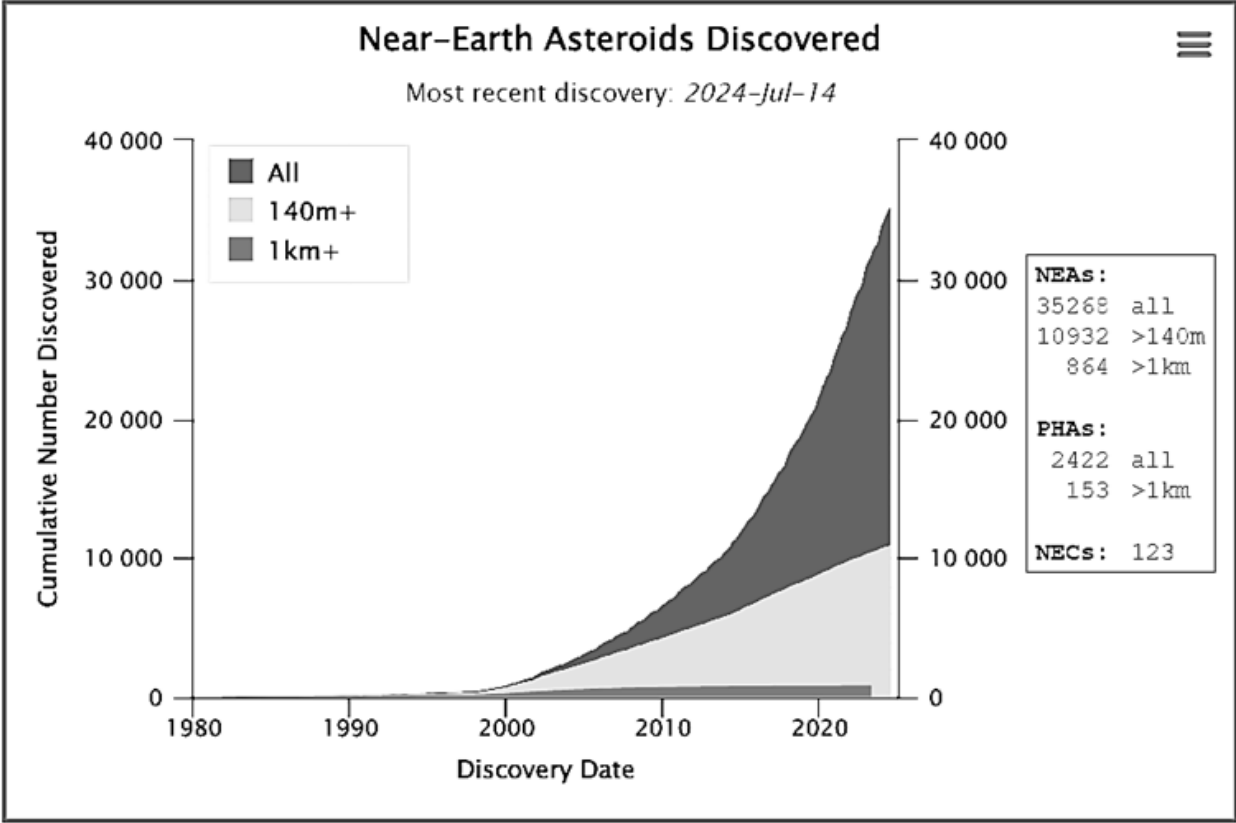


Рис. 2.2. Статистика обнаружения астероидов, сближающихся с Землёй, по состоянию на 14.07.2024.

Таблица 2.2. Зависимость полноты обнаружения АСЗ от размера астероида

Размер АСЗ, м	1	10	50	140	1000	10000
Полнота обнаружения, %	< 0.0001	0.03	~7	~40	> 95	100

Полнота оценивается по отношению к некоторой модели. Для построения модели населения АСЗ часто используется программный комплекс Европейского космического агентства NEOPOR (Near-Earth Object Population Observation Program). NEOPOR позволяет пользователям выполнять:

- генерацию популяций ОСЗ на основе модели Granvik et al. [2.7];
- имитацию наблюдений популяций ОСЗ;
- анализ популяций ОСЗ.

NEOPOR реализован в виде консольной программы и может удобно управляться с помощью графического пользовательского интерфейса, который поставляется вместе с инструментом (в настоящее время доступен NEOPOR версии 1.5, <https://neo.ssa.esa.int/neo-population-generator>). Недавно появилась разработанная с использованием опыта применения NEOPOR и более современных наблюдательных данных модель NEOMOD [2.26].

На рис. 2.3 показаны наблюдаемое распределение АСЗ по размерам, распределение по модели из [2.7], и моделей, представленные в работах других авторов.

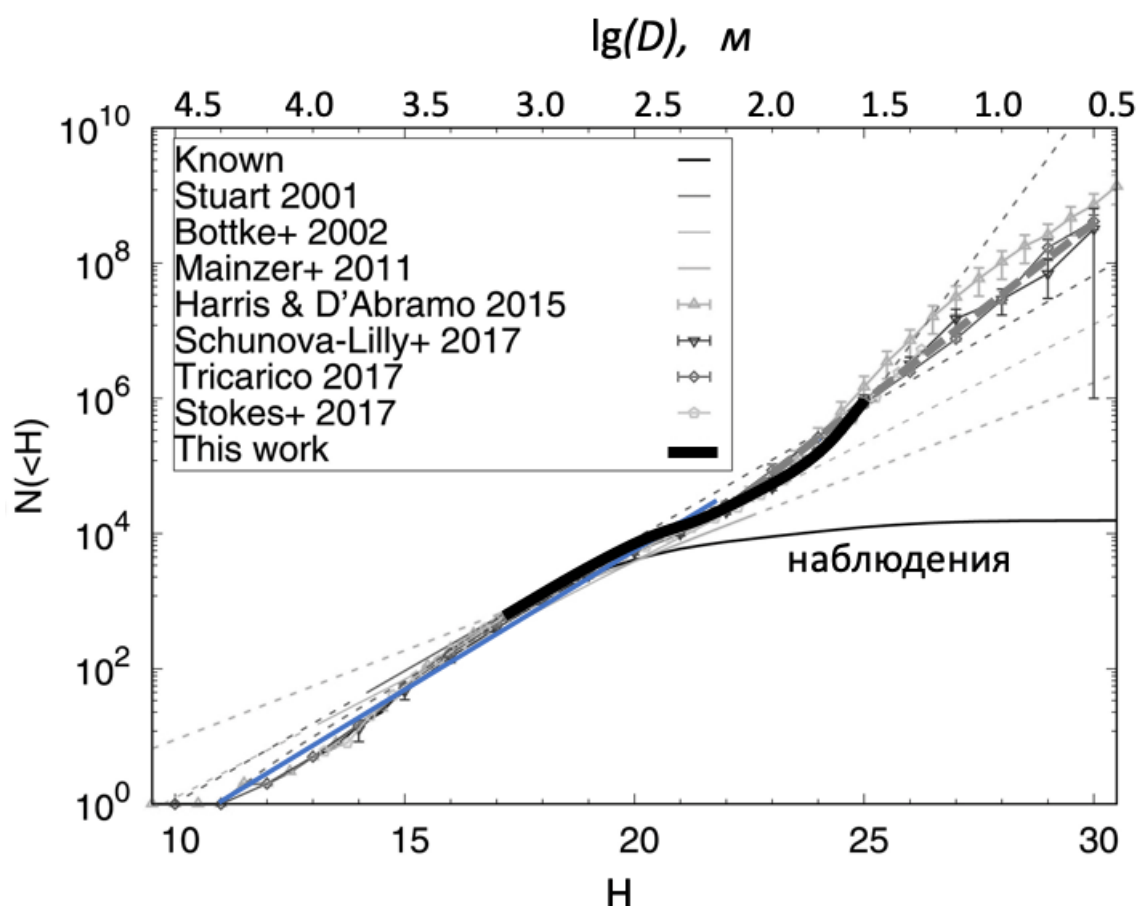


Рис. 2.3. Наблюдаемое кумулятивное распределение АСЗ по  $H$  (также по диаметру  $D$ ), распределение по модели из [2.7] (отмечена как this work), и моделей, представленных в работах других авторов.

Из рис. 2.3 можно оценить количество АСЗ размером более данного. АСЗ размером более 50 м насчитывается  $\sim 10^5$ , а размером более 10 м несколько десятков миллионов. Самый крупный из АСЗ – Ганимед – имеет диаметр 32 км. Самым маленьким известным околоземным астероидом является 2008 TS26 с расчетным диаметром около 1 м.

Как видно из рис. 2.3, чем меньше размер АСЗ, тем больше разброс в распределениях АСЗ по размерам. Естественно, что для трудно наблюдаемых АСЗ малого размера и другие характеристики (распределения) известны также с худшей точностью, чем для более крупных тел. Рассмотрим распределения наблюдаемых АСЗ по орбитальным и физическим параметрам.

#### 2.2.2. Распределения наблюдаемых АСЗ по орбитальным и физическим параметрам

Все АСЗ принято подразделять на несколько типов в зависимости от величины их перигелийного  $q$  или афелийного  $Q$  расстояний и большой полуоси  $a$ . Каждая такая группа именуется по имени астероида, её характерного представителя:

- астероиды типа Амура ((1221) Amor). Перигелийные расстояния больше, чем афелийное расстояние Земли ( $1.017 \text{ а.е.} < q < 1.3 \text{ а.е.}$ ). Астероиды этого типа могут приближаться к Земле извне, но не заходят внутрь орбиты Земли;
- астероиды типа Аполлона ((1862) Apollo). Перигелийные расстояния меньше чем афелийное расстояние Земли, большие полуоси больше, чем у Земли ( $a > 1 \text{ а.е.}, q < 1.017 \text{ а.е.}$ ). Астероиды этого типа могут проникать внутрь орбиты Земли;
- астероиды типа Атона ((2062) Aten). Большие полуоси меньше, чем у Земли, афелийные расстояния больше перигелийного расстояния Земли ( $a < 1 \text{ а.е.}, Q > 0.983 \text{ а.е.}$ ). Орбиты астероидов этого типа лежат в основном внутри орбиты Земли и только в окрестности афелиев выходят за её пределы;
- астероиды типа Атиры ((163693) Atira). Орбиты этих астероидов целиком лежат в пределах орбиты Земли.

Из-за того, что названия «прототипов» всех четырех групп астероидов начинаются на А, АСЗ, иногда, называют АААА-астероидами.

На рис. 2.4. приведена статистика АСЗ по типам (орбит) по состоянию на конец июля 2023 г. В типе Атиры выделен подтип Ватиры. Это АСЗ, орбиты которых целиком лежат в пределах орбиты Венеры ( $Q < 0.72$  а.е.). Пока что известен лишь один представитель этого подтипа – астероид (594913) 'Ayló'chaxnim, открытый в 2020 г. (см. [https://ru.wikipedia.org/wiki/\(594913\)\\_'Ayló'chaxnim](https://ru.wikipedia.org/wiki/(594913)_'Ayló'chaxnim) ).

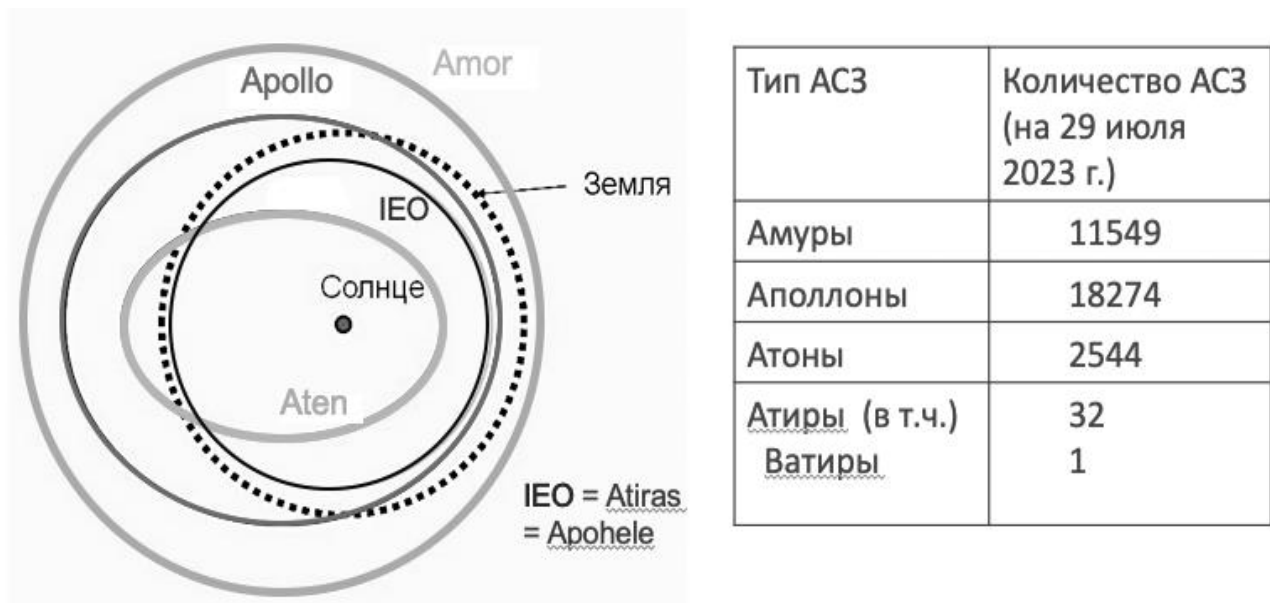


Рис. 2.4. Типы орбит АСЗ и статистика АСЗ по типам (орбит).

В среднем орбиты АСЗ более вытянуты, чем орбиты астероидов Главного пояса астероидов (ГПА), т. е. имеют более высокий эксцентриситет, а большие полуоси их орбит меньше чем у астероидов ГПА (см. рис. 2.5).

На рис. 2.6, построенному по ансамблю известных АСЗ (данные с сайта Центра малых планет, <https://minorplanetcenter.net/>), показано кумулятивное распределение АСЗ по перигелийному расстоянию. Это распределение интересно для анализа термической истории АСЗ. Видно, что количество АСЗ, имеющих  $q < 0.2$  а.е. (термические эффекты могут быть существенны лишь при высоких температурах  $T > 600$  К, что соответствует  $q < 0.2$  а.е.), составляет лишь примерно 0.3% от общего числа.

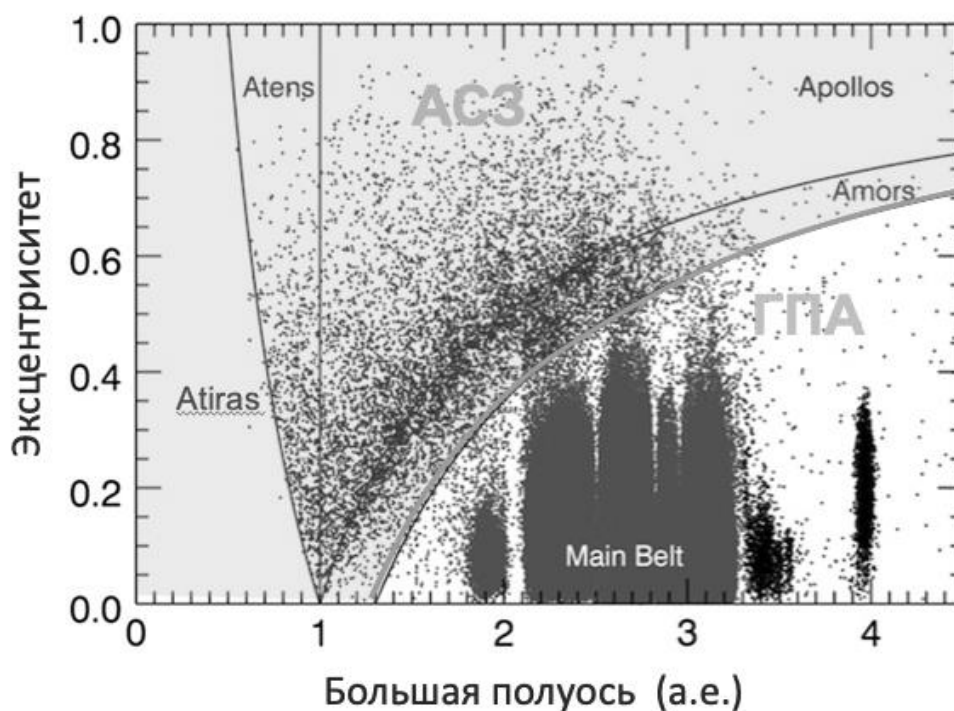


Рис. 2.5. Астероиды ГПА и AC3 на диаграмме эксцентриситет – большая полуось орбиты.

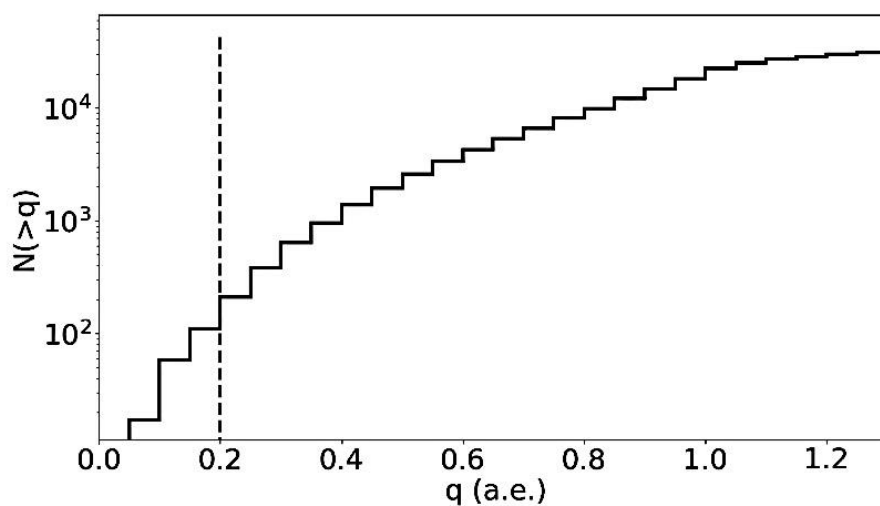


Рис. 2.6. Распределение AC3 по  $q$ .

Приведем также распределение орбит астероидов ГПА и AC3 по наклонению и большой полуоси (см. рис. 2.7). Распределение астероидов ГПА показаны тоновой штриховкой. В среднем наклонение орбит AC3 больше, чем наклонение орбит астероидов Главного пояса.



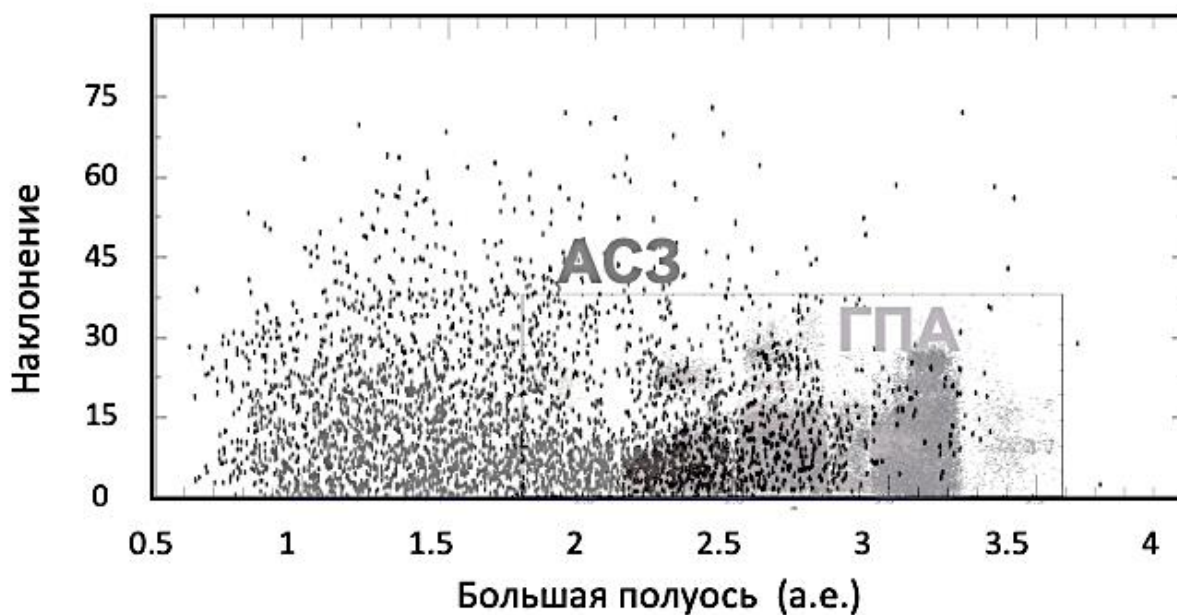


Рис. 2.7. Астероиды ГПА и АСЗ на диаграмме наклонение – большая полуось орбиты.

Что касается физических характеристик АСЗ, то кроме размера АСЗ в контексте проблемы АКО важно также знать и альbedo астероидов, и параметры вращения, и структуру, и состав астероидов.

С практической стороны важно определить параметры вращения астероида, который может столкнуться с Землёй. Для фундаментальной науки большой интерес представляет распределение скоростей вращения. Согласно [2.8] скорости вращения крупных астероидов ( $D > \sim 40$  км) имеют распределение, близкое к Максвелловскому, что позволяет предположить, что они являются либо первоначальными телами Главного пояса астероидов, либо его крупнейшими остатками, образовавшимися в результате столкновений. Небольшие астероиды ( $0.15 < D < 10$  км) демонстрируют значительный избыток как медленных, так и быстрых вращений с «барьером»  $\sim 12$  оборотов в сутки, и некоторые из них представляют собой двойные системы. Эти небольшие астероиды представляют собой фрагменты, образовавшиеся в результате столкновения тел с незначительной прочностью на разрыв (груда щебня, rubble-pile). В основном они набирали угловой момент в результате столкновений, но и другие факторы также повлияли на

скорость их вращения и, возможно, форму. Большинство крошечных астероидов размером менее  $D \approx 0.15$  км вращаются так быстро, что их не может удерживать от разрыва самогравитация, и поэтому они должны быть прочными телами. Вероятно, они представляют собой отдельные сплошные фрагменты.

Распределение угловых скоростей вращения околоземных астероидов отличается от распределения скоростей вращения астероидов ГПА. На рис. 2.8 (взят из [2.9]) приведены распределения по скоростям вращения АСЗ и астероидов Главного пояса.

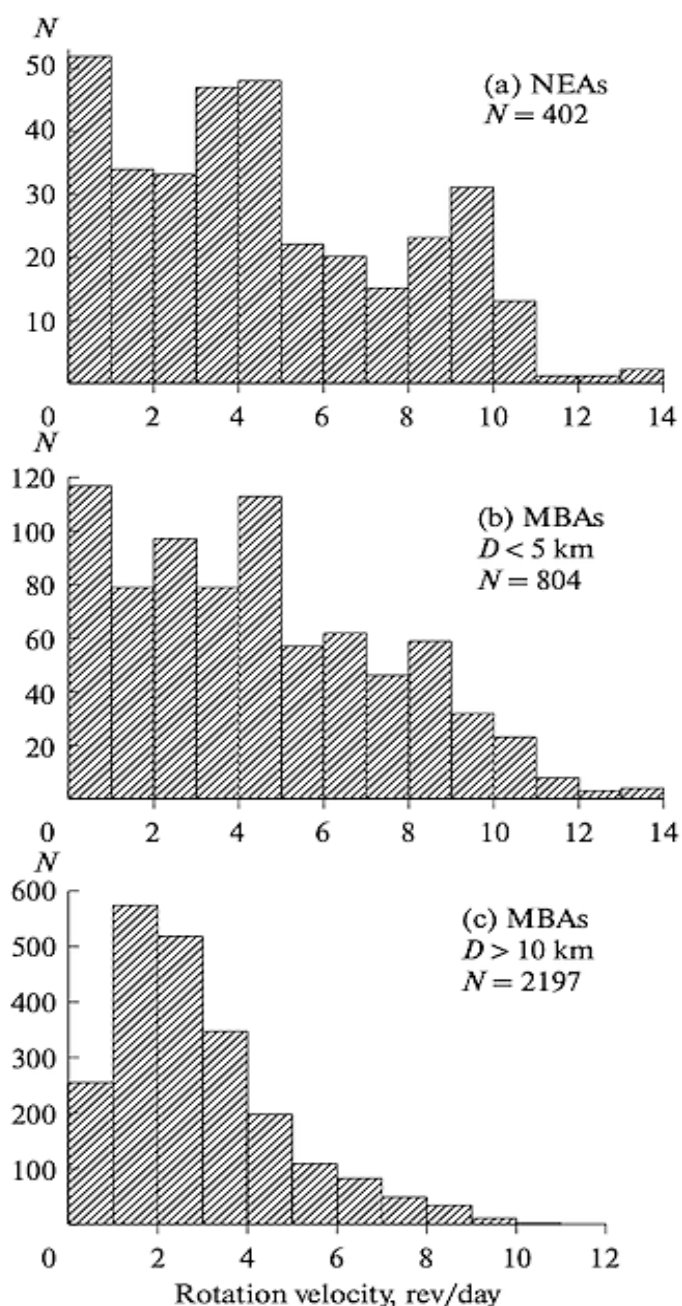


Рис. 2.8. Распределения по угловым скоростям вращения (об./сут.) для АСЗ (NEAs) и астероидов Главного пояса (MBAs) согласно [2.9].

Впрочем, у астероидов одного размерного класса распределения АСЗ и астероидов ГПА отличаются не столь сильно. А что касается крупных астероидов, то по сравнению с ГПА в населении АСЗ есть избыток как быстро, так и медленно вращающихся объектов. Одной из возможных причин этого различия согласно [2.7] является влияние солнечной радиации – так называемый эффект Ярковского, который возникает в результате поглощения солнечной энергии и ее переизлучения в тепловом диапазоне вращающимся телом с некоторым запаздыванием. АСЗ проводят часть времени в области, более близкой к Солнцу по сравнению с астероидами ГПА, и эффект Ярковского для АСЗ проявляется сильнее.

Знание распределения альбедо  $p_V$  астероидов ( $p_V$  – геометрического альбедо в полосе V) важно с практической стороны для построения программ обнаружения АСЗ. В [2.10] представлены результаты наблюдений альбедо 428 околоземных астероидов, наблюдавшихся на КА WISE. Это распределение альбедо достаточно хорошо аппроксимируется с помощью трехпараметрической функции, которая является суммой двух распределений Рэлея (см. рис. 2.9). Три параметрами являются доля объектов в тём-

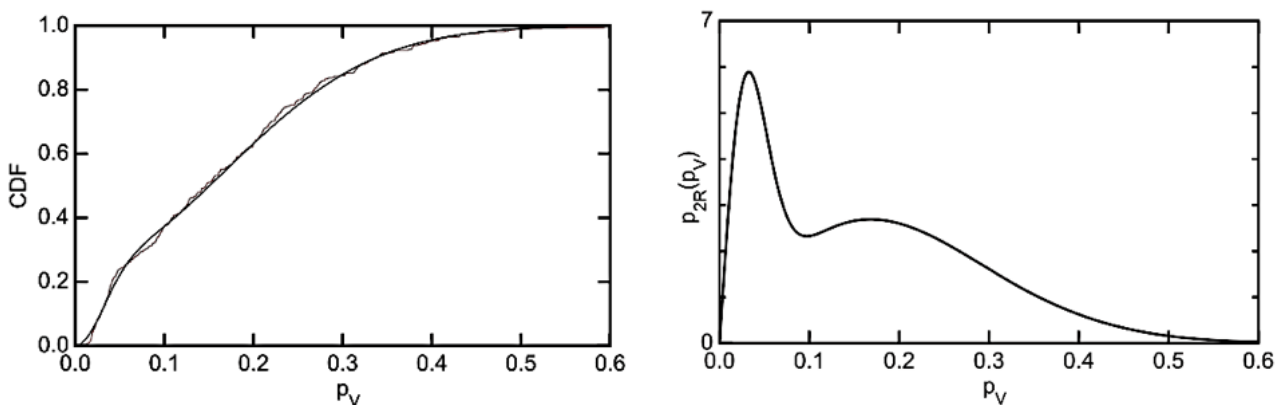


Рис. 2.9. Сравнение кумулятивной функции распределения (CDF) альбедо для наблюдаемого набора АСЗ (слева, тонкая извилистая линия) с CDF для модели двойного распределения Рэлея (показана справа в виде функции плотности вероятности).

ной популяции, положение тёмного пика и положение более яркого пика. Обнаружено, что 25.3% АСЗ, наблюдавшихся WISE, относятся к очень тёмной популяции с максимумом при  $p_V = 0.030$ , в

то время как остальные 74% АСЗ, относятся к умеренно тёмной популяции с максимумом при  $p_V = 0.168$ . Следствием этого бимодального распределения является то, что АСЗ диаметром 140 м на очень темном пике имеет  $H = 23.7^m$ , а не  $H = 22^m$ , как предполагалось. Более 10% ОСЗ оказались очень тёмными, темнее, чем  $p_V = 0.03$ .

Распределение альбеда коррелирует со спектральным типом астероидов. В ГПА астероиды, состоящие из примитивного (первичного) вещества, располагаются на дальнем краю ГПА. Это в основном углеродсодержащие астероиды. По классификации Толена, которая была предложена в 1984 году на основании широкополосных измерений спектра (от 0.31 мкм до 1.06 мкм) и альбеда, они объединены в **группу С** (включает классы С, В, F, G). Астероиды группы С составляют примерно 75% популяции астероидов ГПА. Эти астероиды относительно богаты водой. Астероиды, состоящие из дифференцированного (прошедшего переработку) вещества, располагается ближе к Солнцу, во внутренней области Главного пояса. Это в основном, силикатные астероиды (**группа S**, включает класс S). Они составляют 15% популяции и состоят из силикатных соединений железа и магния). Третья составляющая – это железные астероиды (**группа X**, включает классы M, E, P), которые составляют 10% популяции. В группу входят астероиды, богатые железом, никелем, металлами платиновой группы и т.д. На рис. 2.10 показано относительное распределение различных классов астероидов в интервале средних расстояний от Солнца.

Распределение АСЗ по составу отличаются от астероидов ГПА. Среди АСЗ преобладают астероиды с наиболее дифференцированным веществом. Углеродсодержащих астероидов относительно меньше (уже не 75%, а только около 30%). Среди АСЗ в основном присутствуют силикатные и железные астероиды (с высоким содержанием металлов). Это связано с тем, что АСЗ приходят из разных зон Главного пояса. Это так называемые зоны резонансов (см. раздел 2.2.4). На рис. 2.10. отмечены зоны орбитальных резонансов (по отношению к Юпитеру).

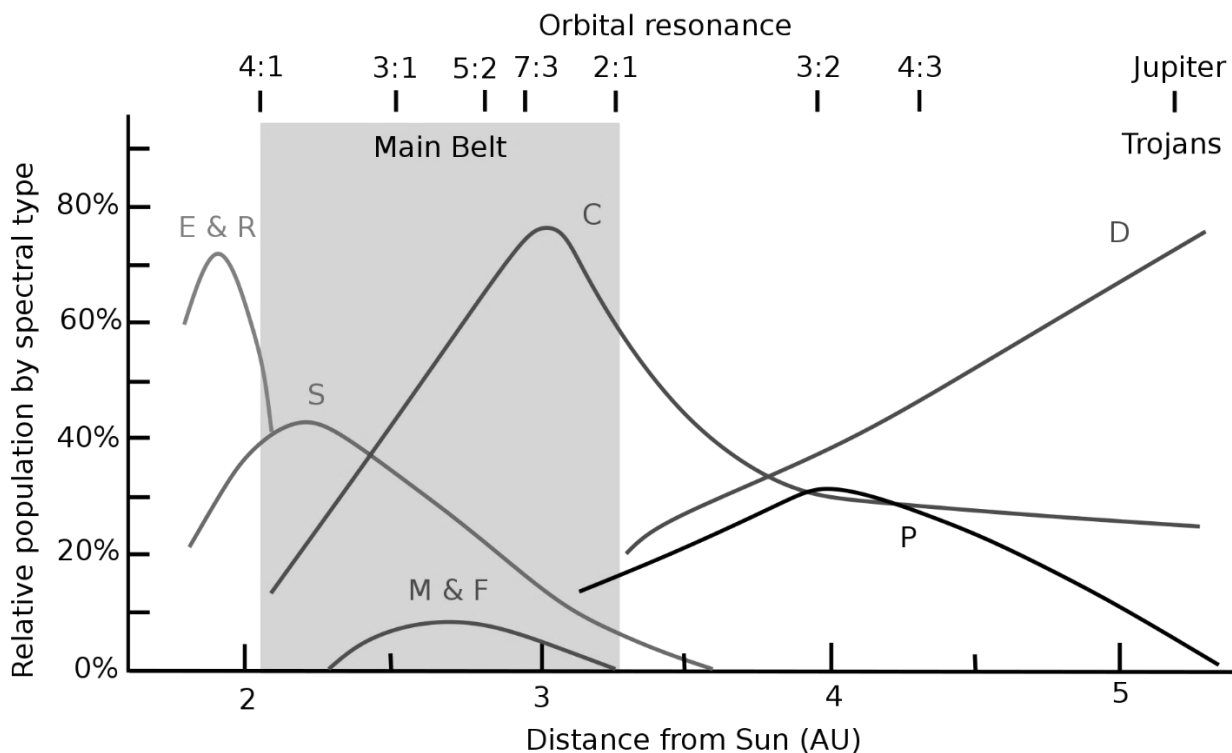


Рис. 2.10. Относительное распределение астероидов основных спектральных классов (по Толену) в интервале средних расстояний от Солнца 1.8–5.3 а.е. Тонировкой выделен Главный пояс астероидов ([https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid\\_spectral\\_types](https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid_spectral_types)).

### 2.2.3. Другие распределения АСЗ, существенные для построения программ обнаружения и мониторинга АСЗ

Помимо орбитальных и физических характеристик АСЗ для практических целей важно знать и другие, более специфичные распределения, которые строятся не только на основе наблюдений, но и на основе моделей.

#### Распределение АСЗ по небесной сфере

В работе [2.11] было показано, что распределение астероидов, сближающихся с Землёй, по небесной сфере зависит от расстояния до Земли. На расстоянии  $R = 1$  а.е. наблюдается сильная концентрация АСЗ к плоскости эклиптики (рис. 2.11), что естественно, а вот на более близких расстояниях ( $< 0.05$  а.е.) распределение по небесной сфере равномерное (рис. 2.12).



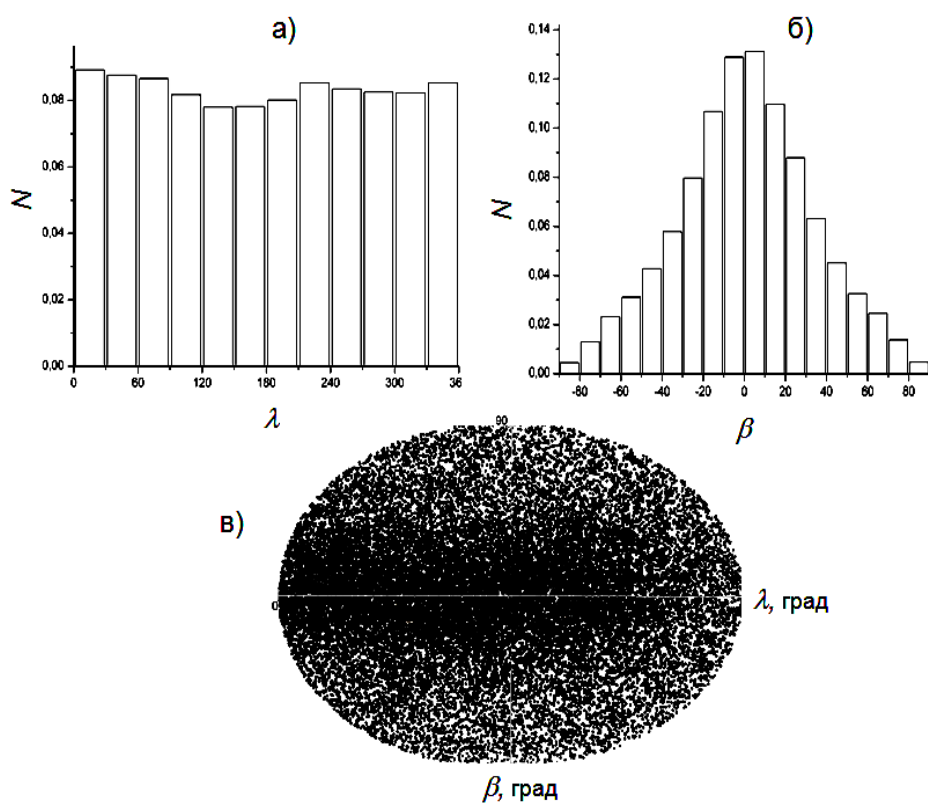


Рис. 2.11. Распределения относительного числа виртуальных АСЗ по геоцентрическим эклиптическим координатам: долготе  $\lambda$  (а) и широте  $\beta$  (б) для расстояния от Земли  $R = 1$  а.е. На нижней панели (в) показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff.

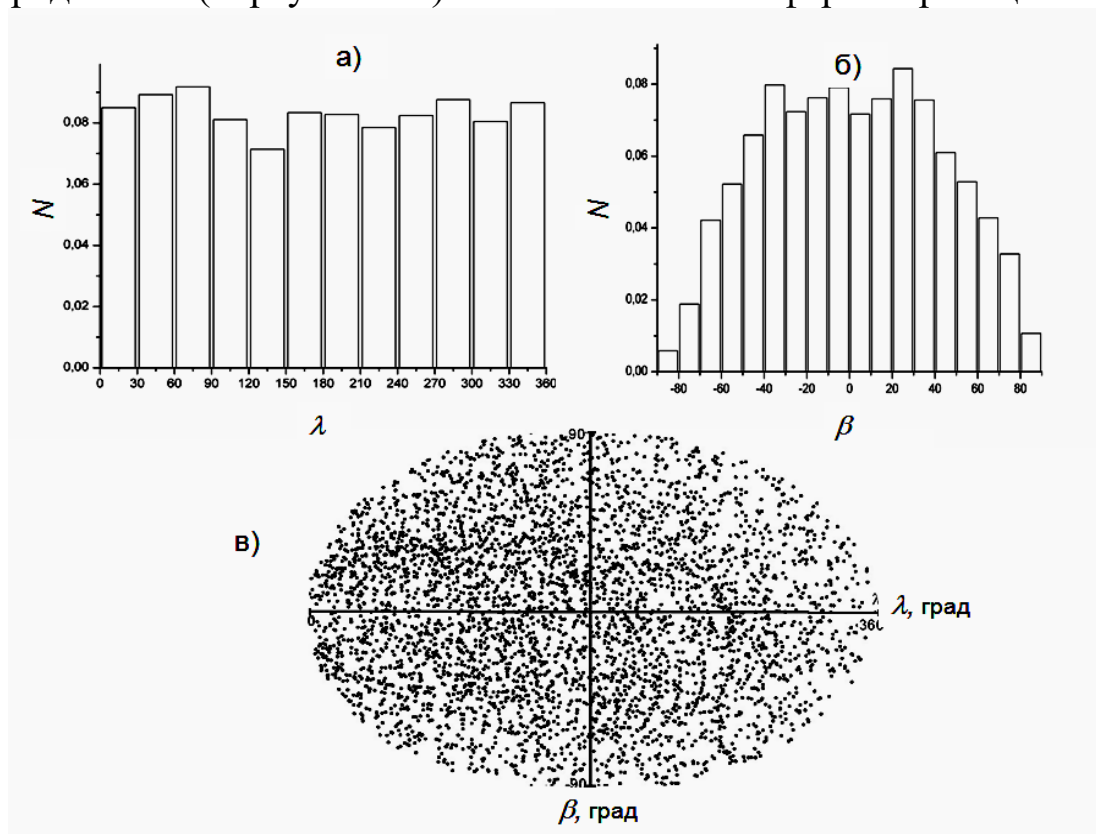


Рис. 2.12. То же, что и на рис. 5.10, но для  $R = 0.05$  а.е.

Последний вывод полностью подтверждает статистика зарегистрированных средствами НАСА за период 1988–2023 болидов, соответствующих входам в атмосферу тел размером от 1 до 20 м (см. <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>). Почти тысяча событий довольно равномерно распределены по поверхности планеты. Также отметим, что числа дневных и ночных болидов практически равны.

Таким образом, программы обнаружения опасных небесных тел в ОКП должны быть настроены на равномерный обзор по всей небесной сфере. А программы, ответственные за обнаружение ОНТ на больших расстояниях, должны чаще проводить обзор на низких эклиптических широтах.

### Скорости сближения с Землёй

Очень важная характеристика, влияющая на выбор систем обнаружения ОНТ – их скорости сближения с Землёй. В [2.11] проведено исследование распределения скоростей сближения всех известных на тот момент потенциально опасных астероидов, независимо от их размера. На рис. 2.13 показано распределение астероидов по скоростям (линейным и угловым), определённым в моменты, когда они пересекали геоцентрическую сферическую оболочку радиусом 0.01 а.е.

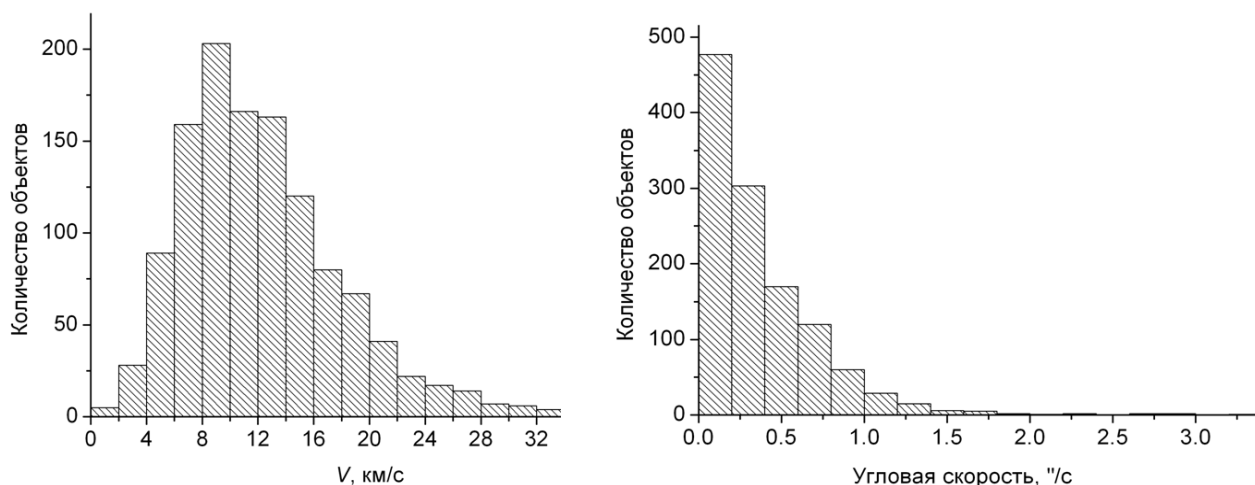


Рис.2.13. Распределение линейных и угловых скоростей потенциально опасных астероидов в моменты, когда они находились на расстоянии 0.01 а.е. от орбиты Земли.

Как видно из рис. 2.13, скорости сближения известных потенциально опасных астероидов с орбитой Земли находятся в границах от  $\sim 1$  до примерно 40 км/с. Большая часть астероидов (95%) сближается с Землёй на скоростях до 25 км/с. Также нужно отметить, что согласно расчетам, представленными в [2.11], большая часть комет, сближающихся с Землёй, может сближаться с орбитой Земли на скоростях от 10 до 25 км/с. Но есть 4 кометы, у которых относительные скорости сближения превышают 40 км/с. Из них две кометы – SOHO кометы (C/1999 X3 (SOHO) и P/1999 J6 (SOHO)) имеют относительные скорости от 40 до 45 км/с и 2 кометы – кометы галлеевского типа (109P/Swift–Tuttle и 55P/Tempel–Tuttle) имеют относительные скорости сближения 59 и 70 км/с, соответственно. Число таких объектов мало и можно сказать, что среди всех известных потенциально опасных объектов 99.8% объектов сближается с Землёй на скоростях до 40 км/с, и лишь 0.2% – на скоростях более 40 км/с. В принципе, при построении системы обнаружения можно пренебречь этой малой долей ОНТ.

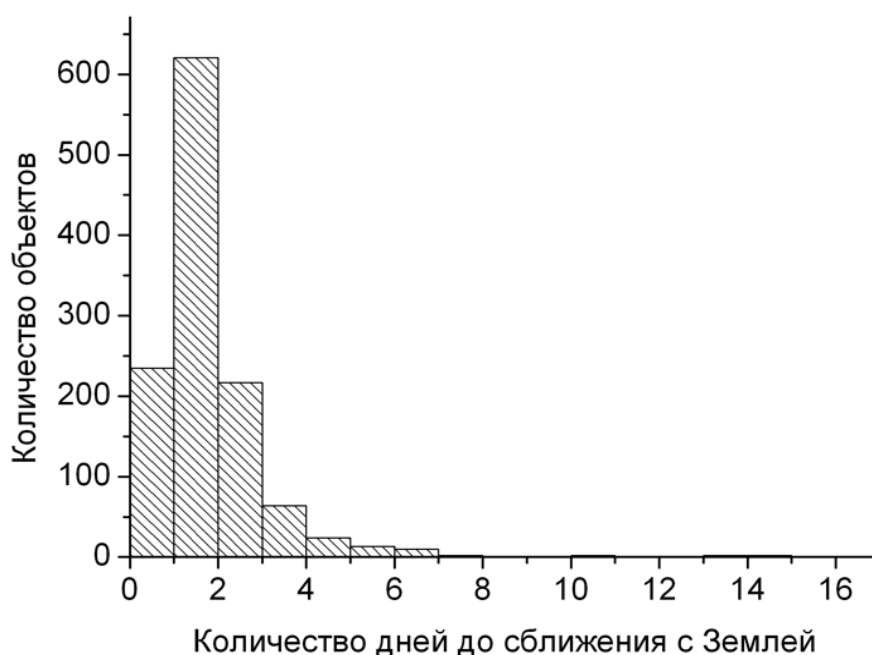


Рис. 2.14. Распределение астероидов по времени пролёта расстояния 0.01 а.е.

Еще одно, полезное для выбора оптимальных средств наблюдений распределение, особенно для наблюдений небольших ОНТ



в ОКП, это распределение астероидов по времени пролёта расстояния 0.01 а.е. показано на рис. 2.14. ОНТ могут пройти расстояние 0.01 а.е. (~1.5 млн км.) за время от 0.2 до 7 суток. Но большинство объектов проходят такое расстояние за 1.5–2 суток. Значит, система обнаружения должна успевать зарегистрировать все ОНТ в ОКП за время не более одного-двух суток.

Напомним, что эти оценки подвержены эффекту наблюдательной селекции, т. к. открыты преимущественно медленные ОНТ. Реальная средняя скорость ОНТ может быть выше.

### Частота сближений с Землёй

На рис. 2.15 показана зависимость частоты входов АСЗ различных размеров в ОКП, рассчитанная с помощью программного комплекса НЕОРОР. Видно, что количество входов астероидов размером более 10 м в околоземную сферу радиусом 1.5 млн км за год составляет несколько тысяч. По более современной модели NEOMOD эта оценка заметно ниже – около тысячи в год. Этот

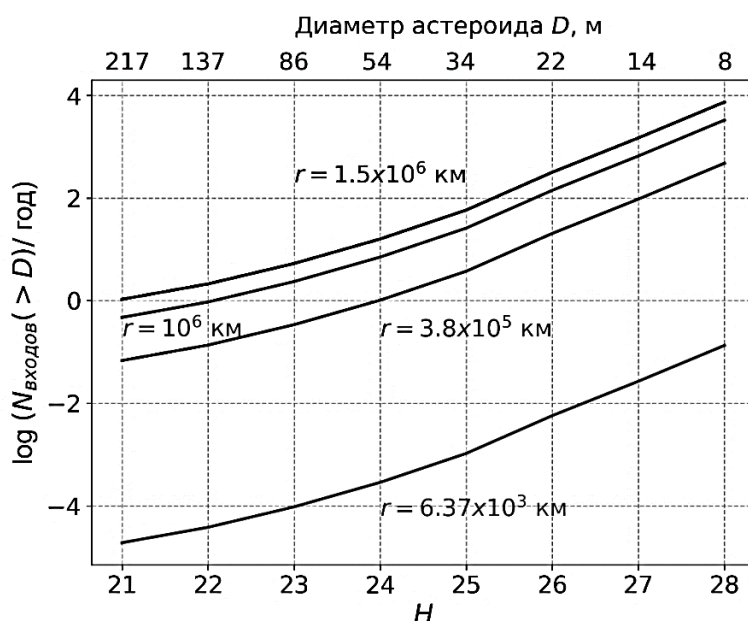


Рис. 2.15. Зависимость частоты входов АСЗ различных размеров в ОКП.

график может быть полезен при контактах читателей этой книги со СМИ, в которых часто по поводу почти каждого сближения АСЗ с Землёй публикуются тревожащие население сообщения. Пролёты астероидов мимо Земли – рядовые события. Их нужно наблюдать, изучать, а вот пугать и пугаться – нет!

#### 2.2.4. Источники и механизмы воспроизводства населения ОСЗ

Одной из особенностей эволюции населения АСЗ является тот факт, что хотя численность АСЗ на протяжении приблизительно трёх последних миллиардов лет оставалась практически неизменной, динамическая шкала текущего населения АСЗ существенно короче этого времени. Под динамической шкалой здесь понимается характерное время, за которое численность текущего населения АСЗ заметно уменьшается. Как правило, для оценки шкалы берут т. н. медианное время  $t_{NEA}$ , т. е. интервал времени, за которое численность  $N$  популяции АСЗ уменьшается вдвое по отношению к начальному значению  $N_0$ . По результатам работ различных авторов в оценках  $t_{NEA}$  есть некоторый разброс, но всё же характерное значение  $t_{NEA}$  составляет несколько миллионов лет ( $\sim 3$  млн лет, согласно [2.12]). Это означает, что население АСЗ непрерывно пополняется. По современным представлениям это пополнение почти полностью определяется источниками в ГПА. Согласно [2.13] 95% АСЗ приходит из Главного пояса астероидов и остальные 5% из Пояса Койпера. Что касается комет, сближающихся с Землёй, то они приходят в основном из пояса Койпера и облака Оорта.

Известны два основных механизма, способствующих выходу астероидов из пояса астероидов. Во-первых, относительно быстрое увеличение эксцентриситета, которое происходит, когда астероиды эволюционируют в областях резонансов по среднему движению (mean motion resonance, MMR) или вековых резонансов (secular resonance, SR), и, во-вторых, хаотическая диффузия по большой полуоси в областях, где резонансы перекрываются. MMR возникают, когда отношение среднего движения астероида  $n$  и планеты  $m$  может быть выражено (малыми) целыми числами. Например,  $n:m = 3:1$  подразумевает MMR, при котором объект обращается вокруг Солнца в три раза быстрее, чем Юпитер. SR возникают, когда периоды прецессии долготы узла или долготы перигелия планеты и астероида совпадают. Важным фактором, способствующим выходу астероидов из ГПА, является так называемый резонанс  $\nu_6$ , который возникает, когда долгота перигелия

астероида прецессирует с той же скоростью, что и долгота перигелия Сатурна.

В результате действия резонансов некоторые области распределения больших полуосей астероидов почти не заполнены. Это так называемые щели или люки Кирквуда (см. рис. 2.16, взятый из Интернета).



Рис. 2.16. Щели Кирквуда.

В очень детальном исследовании [2.14] путей ухода астероидов из ГПА выделено более десяти путей эвакуации (escape routes) из пояса астероидов в область АСЗ, и они в основном совпадают с зонами резонансов низкого порядка по среднему движению с Юпитером и вековых резонансов. В рассмотрение включены эффект Ярковского (и эффект Ярковского-О'Кифи-Радзиевского-Паддэка (YORP)). Эффект Ярковского вызывает медленный дрейф по большой полуоси, который обусловлен анизотропным излучением тепловых фотонов от небольшого безатмосферного тела. В [2.14] сделан вывод о том, что именно эффект Ярковского ответственен за медленный дрейф астероидов ГПА в зоны резонансов и, следовательно, за пополнение населения АСЗ, хотя и остаются определённые вопросы.

Таким образом, понятно, как население АСЗ пополняется. Что касается дальнейшей судьбы АСЗ, то пути ухода астероидов различны. В [2.12] проведен расчет динамической эволюции населения АСЗ. что по результатам данной работы 24.4% всех АСЗ из начального ансамбля было выброшено из Солнечной системы, 3.6% выпало на планеты (в том числе на Землю 0.5%) и 41.5% выпало на Солнце, при этом 30.5% остались в системе, но вышли из области определения АСЗ.

## 2.3. Методы и средства обнаружения и мониторинга ОСЗ

Задачи обнаружения и мониторинга (подхвата, follow up) опасных небесных тел существенно различны и, как правило, требуют для выполнения различных средств. Современные средства обнаружения – это либо широкоугольные оптические, либо (единичные случаи) инфракрасные телескопы, которые должны обеспечивать непрерывные обзорные наблюдения всего неба. Для мониторинга ОНТ можно использовать обычные телескопы, включая и радиотелескопы, точнее радары.

### 2.3.1. О выборе параметров системы обнаружения

Понятно, что крупные ОНТ обнаружить легче. Однако задача массового обнаружения ставится, прежде всего, для наиболее многочисленных ОНТ малого размера. Обнаружение таких объектов на большом расстоянии – очень трудная техническая задача, поскольку требуется создание крупноапертурных широкоугольных инструментов, стоимость создания которых весьма высока. Здесь важен компромисс: нужно обнаружить ОНТ на таком расстоянии, чтобы успеть среагировать на возможную угрозу (столкновения с ним) и в то же время не тратить чрезмерные средства для построения сложной системы обнаружения на очень больших расстояниях.

Проведем краткое обоснование выбора параметров системы обнаружения. Введём несколько определений:

$t_{\text{п}}$  – **подлетное время**. В первом приближении  $t_{\text{п}} = d/V_{\text{max}}$ ,  
где  $d$  – расстояние до объекта,  $V_{\text{max}}$  – максимальная

скорость сближения АСЗ с Землёй;

$t_y$  – **время упреждения**. Необходимое время для принятия соответствующих мер противодействия. Типичная современная оценка времени упреждения – 30 суток (см., например, [2.15]). Очевидное условие  $t_{\Pi} \geq t_y$  (для простоты примем  $t_{\Pi} = t_y$ );

$t_H$  – **время обнаружения**. Необходимый минимальный интервал времени от первого наблюдения до возможного сближения;

$\Delta t_H$  – **время квалификации**, т. е. минимальный интервал времени, необходимый для предварительной классификации орбиты тела.

Логично внести следующее требование к системе обнаружения:

$$t_H = t_y + \Delta t_H . \quad (2.3)$$

Тогда расстояние  $d_H$ , на котором нужно провести первое наблюдение малого небесного тела, определяется как

$$d_H = t_H V_{\max} = (t_y + \Delta t_H) V_{\max} . \quad (2.4)$$

Из информации, приведенной в разделе 2.2, можно принять, что  $V_{\max} = 40$  км/с.

Естественно, что звёздная величина обнаруживаемого тела заданного размера зависит от  $d_H$ , и проникающая сила инструмента обнаружения (телескопа) должна обеспечивать возможность обнаружения тела такой звёздной величины за оптимальную для обзора экспозицию. Проникающая сила телескопа определяет его основные конструктивные характеристики и, соответственно, его стоимость.

Для определения  $d_H$  по формуле (2.4) нужно определить значение  $\Delta t_H$ . В идеальном случае, когда опасный объект был открыт заблаговременно, например, за несколько лет или даже за несколько десятков лет, у астрономов достаточно времени, чтобы точно определить орбиту и понять, столкнется тело с планетой или нет. Естественен вопрос – какова минимальная необходимая длина

$\Delta t_H$  дуги наблюдений, чтобы можно было достаточно точно рассчитать вероятность столкновения? В статье [2.16] эти вопросы рассмотрены подробно. По результатам моделирования, учитывающего все важные астрономические и технические факторы: параметры орбиты ОНТ, параметры телескопа, условия освещённости объекта, влияние смаза изображения ОНТ на детекторе и т.д., определена зависимость «размер ОНТ – время обнаружения» (показана на рис. 2.17). Были рассмотрены различные типы

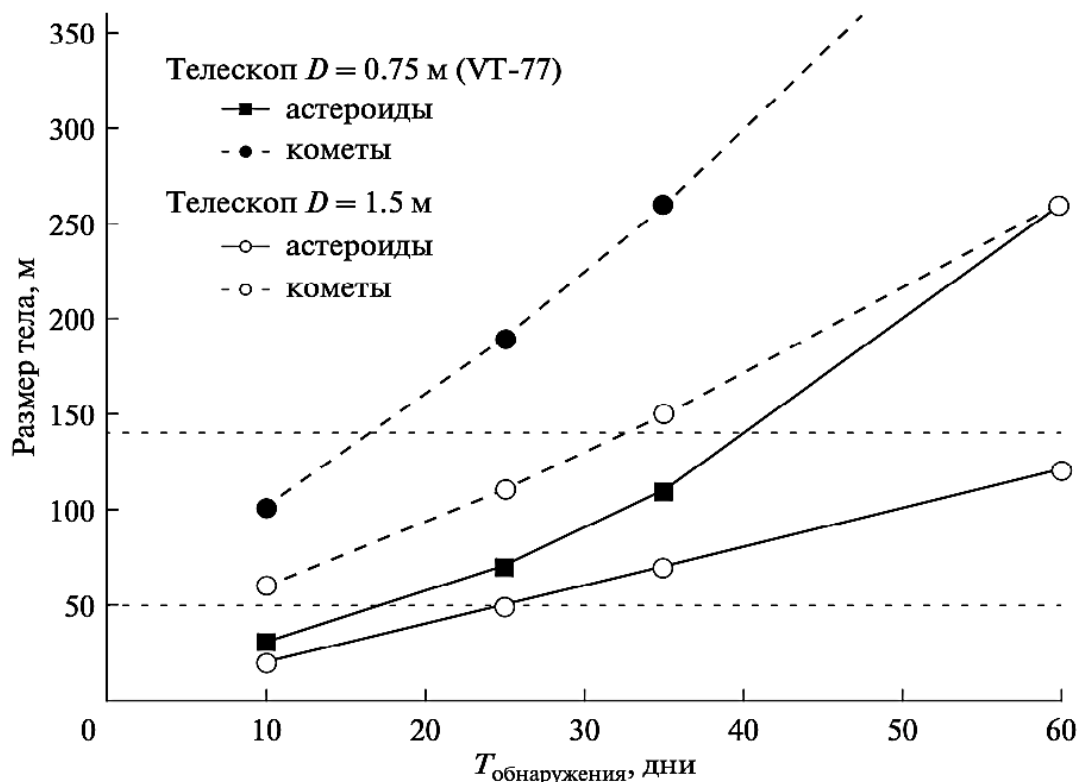


Рис. 2.17. Зависимость «размер ОНТ–время обнаружения» для телескопа VT-77 (0.75 м) и телескопа с зеркалом 1.5 м.

орбит. В качестве конкретных примеров были, в частности, взяты: астероидная орбита с эксцентриситетом 0.57 и большой полуосью 2.13 а.е. и кометная орбита с эксцентриситетом 0.96 и большой полуосью 26.09 а.е. Из рис. 2.17 видно, что для телескопа VT77 (апертура 0.75 м, поле зрения  $7^\circ$ )  $t_H = 35$  суток обеспечивается лишь для тел крупнее 100 м (на астероидной орбите) и для тел крупнее 250 м (на кометной орбите). Общие выводы: для обеспечения требуемых условий, т. е. обнаружения тел размером более

50 м не позднее чем за  $\sim 1$  месяц до возможного сближения (столкновения) с Землёй, необходимы телескопы апертурой  $\sim 1$  м. Для обеспечения разумного времени обзора всего неба за несколько дней нужна сеть как минимум из 4-х широкоугольных телескопов метрового класса. В реальных условиях это число должно быть существенно бóльшим.

Обнаружения астероидов размером  $\sim 10$  м на дальних расстояниях (с большим временем упреждения) при современном уровне технологий невозможно. Нужны средства обнаружения таких тел хотя бы в ОКП. Малые расстояния естественно означают очень короткие времена упреждения (как было показано выше при обсуждении рисунка 2.14, 1-2 дня) и, следовательно, необходимо проводить обзоры всего неба очень быстро (за несколько часов). Для этого необходимо иметь обширную сеть широкоугольных телескопов с относительно небольшой апертурой.

Резюмируя этот анализ требований к системе обнаружения, отметим, что система обнаружения опасных небесных тел должна обеспечивать два режима:

**Дальнее обнаружение** (Размер тел  $> 50$  м)

- время упреждения  $> 30$  суток, (т. е. время обнаружения  $> 35$  суток);
- время обзора всего неба  $< 5$  суток;
- основные средства – телескопы видимого (и в идеале – ИК) диапазонов;
- нужно работать на пределе  $23^mV$ , широкоугольными ( $\omega > 3^\circ$ ) крупноапертурными ( $\varnothing \sim 1$  м) телескопами.

**Ближнее обнаружение** (Размер тел  $> 10$  м)

- время упреждения – 1–2 дня;
- время обзора небосвода  $\sim$  несколько часов;
- основные средства – телескопы видимого (и в идеале – ИК) диапазонов. Нужно работать на пределе  $17^mV$ , широкоугольными ( $\omega > 5^\circ$ ) малоапертурным ( $\varnothing < 0.5$  м) телескопами.

### 2.3.2. Телескопы, используемые для обнаружения и мониторинга ОСЗ

В этом разделе приведены примеры телескопов, используемых (или создаваемых) для обнаружения и мониторинга АСЗ. На сайте [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_near-Earth\\_object\\_observation\\_projects](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_near-Earth_object_observation_projects) перечислены 30 проектов (программ) по обнаружению и мониторингу ОСЗ (см. также книгу [2.2]). В основном, это проекты, осуществлённые, осуществляемые и планируемые в США. Также перечислены 8 проектов других стран – ЕС, Китай, Чили, 1 программа – из Украины, но по наблюдениям не ОСЗ, а объектов в ОКП (УМОС – *Українська мережа оптичних станцій дослідження навколоземного космічного простору*).

До середины 90-х годов прошлого века обнаружение опасных тел осуществлялось либо в рамках отдельных астрономических программ исследований астероидов и комет, либо случайно. Темп обнаружения объектов, сближающихся с Землёй, резко возрос, начиная с 1998 г. Это связано с началом в США специальной программы «Космическая стража» (Space Guard Survey), которая получила финансовую поддержку со стороны Конгресса США. При этом NASA поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90% крупных (размером более 1 км в диаметре) астероидов, сближающихся с Землёй. Считается, что к концу 2009 г. эта задача была выполнена. Среди полностью реализованных и ныне действующих проектов стоит отметить Catalina Sky Survey (см. рис. 2.18). Данный проект является весьма плодотворным астрономическим обзором.

Основной задачей на современном уровне является выявление 90% околоземных астероидов размером более 140 метров. Программа финансируется Конгрессом США. Обзор проводится на обсерватории Steward Аризонского университета. Сейчас обзор за одну ночь наблюдений охватывает более 800 квадратных градусов. Основным инструментом проекта является 0.6 м телескоп системы Шмидта с 16-мегапиксельной ПЗС камерой и полем зрения  $3.9^{\circ} \times 3.9^{\circ}$ .

Среди других базовых инструментов отметим проект Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System).



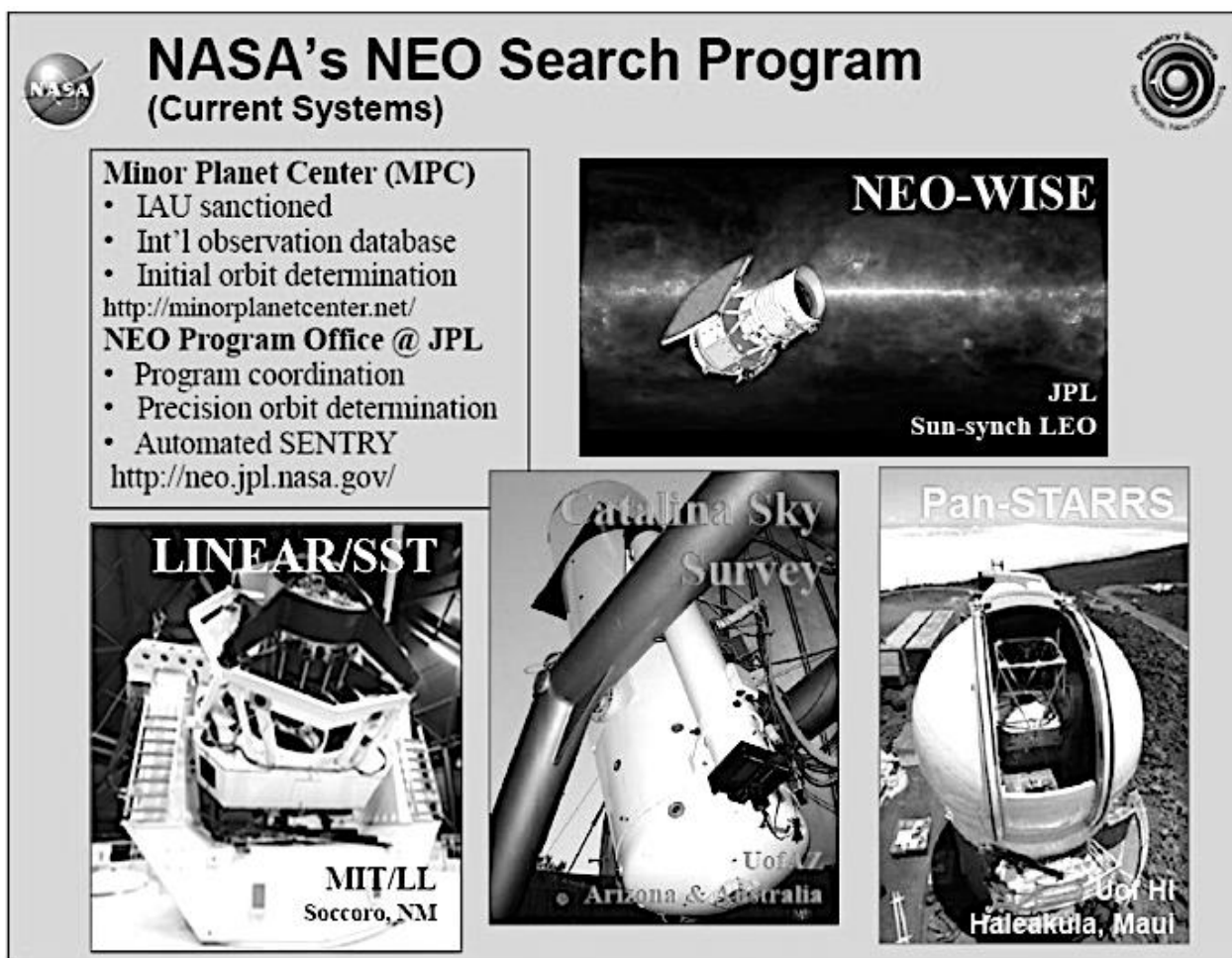


Рис. 2.18. Базовые инструменты NASA системы обнаружения АСЗ (по материалам NASA).

Он представляет собой расположенную на Гавайях (США) систему из двух телескопов апертурой 1.8 м. Один из телескопов используется в основном ВВС США, другой – принадлежит Гавайскому университету. Поле зрения каждого телескопа  $3^\circ$ , размеры ПЗС-приемника 1.4 млрд пикселей. За 60 с достигается 24-я звездная величина. Проект позволяет открывать до двух десятков околоземных объектов за одну ночь. В режиме обзорного поиска эти телескопы способны покрыть всю доступную площадь неба трижды в течение месяца. Стоимость создания одного телескопа превышает 100 млн долларов США. Значительную долю стоимости составляют расходы на компьютерное оборудование и программное обеспечение.

Уже более 10 лет проводятся наблюдения с телескопом SST

(Space Surveillance Telescope, Телескоп для контроля космоса). Это 3.5-метровый телескоп трехзеркальной системы Мерсенна-Шмидта, на котором ведутся наблюдения прежде всего военного назначения. ПЗС-детекторы расположены на кривой фокальной поверхности. Телескоп используется для задачи обнаружения опасных астероидов, совместно с Линкольновской лабораторией Массачусетского технологического института, а также и для астрофизических целей.

В 2025 г. ожидается ввод в строй гигантского обзорного телескопа 8-метрового класса LSST (The Large Synoptic Survey Telescope). Это проект уникальной системы гражданского назначения, предназначенной для выполнения обзоров неба как в целях астрофизики и космологии, так и для поисков опасных тел. Система будет способна каждые 15 секунд наблюдать участок неба, в 50 раз превышающий по площади полную Луну с регистрацией объектов до 24.5-й звёздной величины. Цифровая камера телескопа будет иметь  $3 \cdot 10^9$  пикселей, а полный объем информации, получаемый в течение одной ночи, составит около 15 терабайт.

В США также развиваются программы создания более скромных, но более оперативных систем. К ним в первую очередь стоит отнести проект ATLAS (Asteroid Terrestrial-Impact Last Alert System). В состав системы входят четыре телескопа. Два из них расположены на Гавайских островах, третий телескоп расположен в Южноафриканской астрономической обсерватории в Сазерленде, а четвёртый — в обсерватории Эль-Соус в Рио-Уртадо (Чили). Общая концепция системы ATLAS подразумевает совместную работу восьми телескопов системы Райта-Шмидта с диаметром зеркала 50 сантиметров и относительным отверстием  $f/2$ , каждый из которых оборудован камерой со 110-мегапиксельным ПЗС. Эта система позволяет снять все ночное небо, видимое с одного места, сделав примерно 1000 наведений телескопа. Экспозиция каждого снимка 30 секунд, плюс 10 секунд тратится на считывание с камеры с одновременным переводом телескопа на следующий участок неба. Таким образом, каждое устройство системы ATLAS способно каждую ночь сканировать все видимое небо с меридиальным пределом полноты при видимой звёздной величине  $19^m$ .

Поскольку задача системы ATLAS – идентификация движущихся объектов, каждый телескоп фактически наблюдает одну четверть неба четыре раза в ночь с примерно 15-минутными интервалами. Автоматизированная система обеспечивает предупреждение о приближении астероидов диаметром 45 м за неделю, а за три недели – астероидов диаметром 120 м.

Особые перспективы для обнаружения ОНТ имеют космические телескопы с инфракрасными (ИК) приемниками излучения. Это доказано на примере КА WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer). Запущенный NASA в конце 2009 г. аппарат проработал на орбите до 2024 года, включая посткриогенную часть миссии – NEOWISE. WISE картографировал небо в 4-х длинах волн: 3.3; 4.7; 12 и 23 мкм. На длинах волн 12 и 23 мкм чувствительность детекторов WISE в 1000 раз превосходила показатели хорошо известной астрофизикам инфракрасной обсерватории IRAS. В ходе основной миссии, а также расширенной миссии NEOWISE уже без использования хладоагента, было обнаружено свыше 33.5 тыс. новых малых тел Солнечной системы, включая 108 АСЗ, 21 ПОА и 17 комет. В настоящее время идет создание новой космической ИК обсерватории. Проект называется NEO Surveyor. Его особенностью является размещение КА, несущего ИК-телескоп апертурой 50 см, в окрестности точки Лагранжа L1 в системе Солнце-Земля, что позволит ему наблюдать объекты внутри орбиты Земли, а детекторы среднего инфракрасного диапазона смогут обнаруживать астероиды вне зависимости от их освещения Солнцем. Максимально используется опыт астрофизической ИК обсерватории Spitzer.

Регулярные наблюдения астероидов в режиме мониторинга проводятся на единственном в данное время планетарном радаре Goldstone. РЛС Голдстоун, используемая для локации малых тел Солнечной системы, входит в сеть Дальней космической связи NASA и располагается в пустыне Мохаве, Калифорния, США. Задачей радиолокации занимается 70-метровая антенна DSS-14 «Марс». DSS-14 работает на длине волны 3.5 мм (8560 МГц) и позволяет получать снимки с разрешением до 4 м. Такой показатель был достигнут, в частности, в ходе локации околоземного астерои-

да 2005 YU55.

В Европе есть специально выделенные оптические телескопы (до 1 м в диаметре) для задачи наблюдения АСЗ. Наиболее известные инструменты находятся в испанских обсерваториях Тейде и Ла Сагра. В системе Европейского космического агентства завершается ввод в строй 1-метрового телескопа с очень большим полем зрения (до 45 кв. градусов), организованном по принципу «глаз мухи». Этот телескоп NEOSTEL, также известный как "Flyeye", предназначен для обнаружения околоземных объектов размером 40 метров и более за несколько недель до их столкновения с Землёй. У телескопа NEOSTEL оригинальное решение оптической системы. Свет поступает в телескоп NEOSTEL через апертуру и отражается от основного зеркала на вторичное, состоящее из 16 зеркал, расположенных на шестиугольной пирамиде. Затем расщепленный луч проходит через 16 отдельных асферических линз и далее к 16 соответствующим ПЗС-камерам (рис. 2.19).

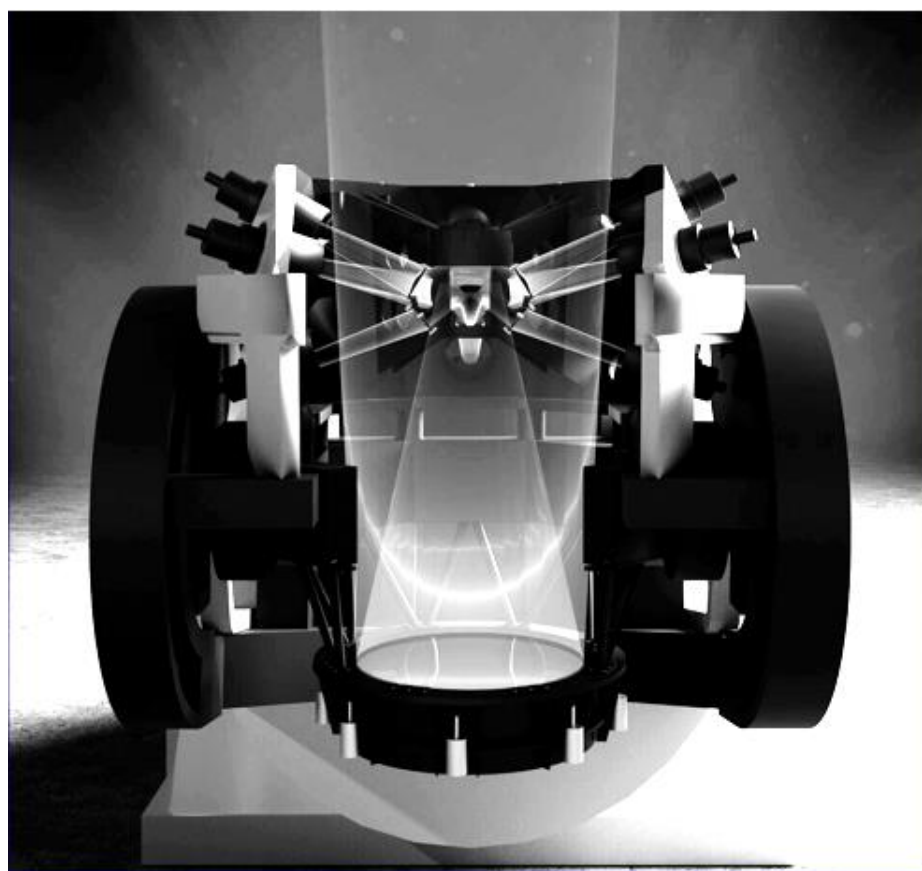


Рис. 2.19. Ход лучей в телескопе NEOSTEL (ESA).

В последнее время Китай энергично развивает свою систему наблюдений объектов в ОКП, а также АСЗ. По программам наблюдений ОСЗ работают 5 телескопов апертурой от 1 до 2.2 м, в том числе 1 м обзорный телескоп. Строятся два 3 м телескопа: один обзорный с полем зрения 9 квадратных градусов и один для высокоточных спектральных наблюдений, а также два 1.5 м телескопа с полями зрения 36 кв. градусов.

Вклад Российских обсерваторий в решении проблемы АКО, к сожалению, пока невелик. В первую очередь, выражается в эпизодическом открытии астероидов и комет (в том числе в единичных случаях – потенциально опасных тел), уточнении орбит отдельных тел, проведении исследований физических свойств АСЗ, а также в мониторинге уже открытых объектов. В последнее время в части наблюдений ОНТ в России вроде бы наметился определённый прогресс. В ИСЗФ СО РАН появился свой телескоп для обнаружения ОНТ в дальнем космосе. Это крупный (1.6 м) широкоугольный (2.8 градуса) обзорный телескоп АЗТ-33ВМ. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на этом перспективном инструменте, показаны на рис. 2.20.

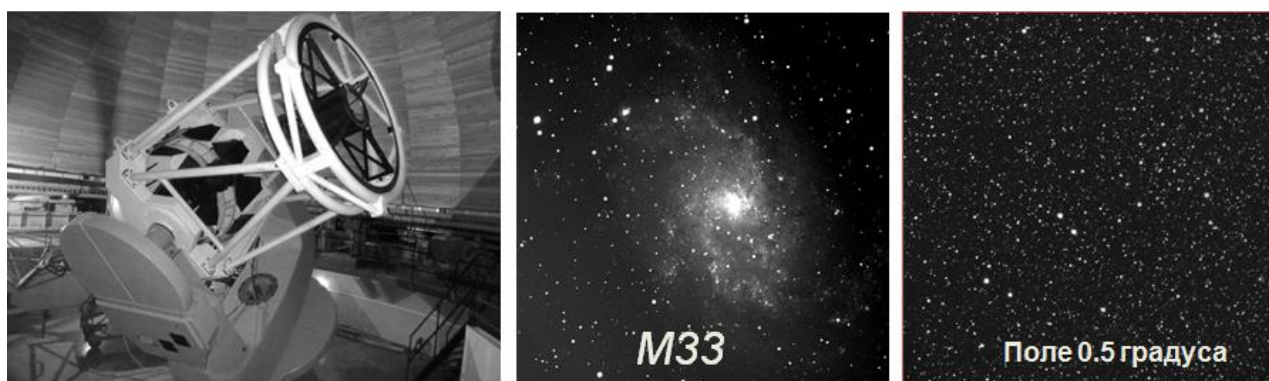


Рис.2.20. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на нем.

Телескоп по своим потенциальным возможностям сравним со знаменитым инструментом Pan-STARRS. К сожалению, не обошлось без трудностей. Телескоп введён в опытную эксплуатацию в декабре 2015 г., но до сих пор не может заработать в полную силу из-за проблем с получением и установкой широкопанорамного приёмника излучения.

В России существует несколько открытых наблюдательных сетей наземных малоапертурных оптических средств: сеть ISON (пара телескопов работает по наблюдениям астероидов и комет, головная организация – Институт прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша), сеть МАСТЕР (астероиды наблюдаются время от времени, основная программа наблюдений – астрофизическая, головная организация – Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова), и эпизодически (редко) работающая по кооперативным программам наблюдений астероидов сеть обсерваторий бывшего СССР (головная организация – Институт астрономии РАН).

Кроме проведения наблюдений, важную роль играют специализированные центры данных по АСЗ.

В России наиболее известны такие центры в ГАО РАН и ИПА РАН. В документах, принятых в ООН, зафиксирована ведущая роль в мире трёх информационно-аналитических центров по проблеме АКО. Два из них контролируются США:

- MPC (Центр малых планет. Работает под эгидой Международного астрономического союза, расположен в США, финансируется NASA);
- NASA NEO Program Office at JPL (Программный центр NASA по проблеме АКО в Лаборатории реактивного движения);
- ESA SSA NEO Centre (Центр по проблеме АКО программы SSA (Space Situation Awareness, недавно название программы изменено на Space Safety) Европейского космического агентства).

Российских центров в этом элитном списке нет, но есть надежда, что после реализации проекта «Млечный путь» будет и российский центр с мировой известностью.

Проблема АКО, по сути, глобальная и для ее решения необходимы усилия многих стран, и такая работа ведётся. Под эгидой ООН кооперацией астрономических институтов и других организаций выполняется проект IAWN (International Asteroid Warning Network – международная сеть предупреждения об опасных астероидах). ИНАСАН участвует в работе сети с 2016 г. В рамках меж-

дународного сотрудничества IAWN в 2017 г. был проведен наблюдательный эксперимент по обнаружению и последующему наблюдению астероида 2012 TC<sub>4</sub>. На протяжении четырех месяцев астрономы из США, Канады, Колумбии, Германии, Израиля, Италии, Японии, Нидерландов, России и ЮАР отслеживали астероид с помощью наземных и космических телескопов в оптическом и радиодиапазонах с целью изучения его орбиты, формы, особенностей вращения и состава (см. [2.17]). Полученный в рамках кампании богатый наблюдательный материал позволил, в частности, точно рассчитать орбиту астероида 2014 TC<sub>4</sub>. Со стороны России наблюдения астероида 2012 TC<sub>4</sub> были проведены Терскольским филиалом ИНАСАН на 2-м телескопе Цейсс-2000.

Успешное проведение кампании по наблюдениям астероида 2012 TC<sub>4</sub> показало готовность ученых разных стран к участию в серьезном международном сотрудничестве по предотвращению потенциальной угрозы для Земли со стороны околоземных объектов, и продемонстрировала работоспособность сети IAWN. В феврале 2018 г. в проект IAWN включились Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН и Коуровская обсерватория УрФУ, затем – ИПМ РАН.

Итак, российские научные центры проявили интерес к участию в международной кооперации по решению важной задачи обнаружения ОНТ.

### 2.3.3. Проблема обнаружения ОСЗ, сближающихся с Землёй со стороны Солнца (с дневного неба)

Наземные телескопы и телескопы, размещенные в ближнем космосе, не способны обнаруживать тела, приходящие с дневного неба. Оптические телескопы на дневном небе «слепы». Мощные наземные радары с достаточно широким главным лепестком диаграммы направленности, используемые для мониторинга (в том числе и обнаружения) объектов в ОКП неэффективны на расстояниях более нескольких тысяч км. Челябинское событие 15 февраля 2013 г. послужило подтверждением этого принципиального факта.



Для того, чтобы наблюдать такие астероиды, нужны оптические телескопы, удаленные от Земли на значительное расстояние.

В ИНАСАН разработан авангардный проект системы СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов) для поиска опасных небесных тел, приходящих с дневного неба (см. [2.18]). Основная идея состоит в следующем: создается космическая система из 1–2-х космических аппаратов, размещенных в окрестности точки Лагранжа L1 (в системе Земля–Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Каждый КА оснащен одним или несколькими телескопами. Телескопы, находящиеся в окрестности точки L1, будут «видеть» ОНТ размером от 10 м, летящие к Земле от Солнца, при всегда благоприятных для наблюдений значениях фазового угла. Видимая звездная величина ОНТ размером 10 м на расстоянии 1 млн км составит  $V = 17^m$  (при альбедо 0.15).

Предварительный анализ этих условий показывает, что задача обнаружения декаметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца, при условии размещения телескопа в точке L1 может быть решена с помощью относительно небольших телескопов апертурой около 0.25 м.

Главный режим работы космической обсерватории для обнаружения ОНТ, летящих со стороны Солнца, – создание конусного барьера(ов) углом раствора около  $90^\circ$  и «угловой толщиной» барьера, равной диаметру поля зрения телескопа (см. рис. 2.21).

Опасное тело при пересечении барьера наблюдается несколько раз, что позволяет по короткой дуге получить предварительную орбиту и выполнить первичную ее классификацию. Если тело требует повышенного внимания, один из телескопов переходит в режим сопровождения и постоянно наблюдает это тело до сближения с Землей, что позволяет максимально уточнить его орбиту и максимально точно определить возможное место входа в атмосферу. Наблюдения в режиме сопровождения прекращаются не позже, чем за примерно 4 часа до возможного столкновения (это соответствует, при скорости сближения, равной 19 км/с, расстоянию от Земли около 270 тыс. км).

Оптимальным был бы вариант из двух космических аппа-



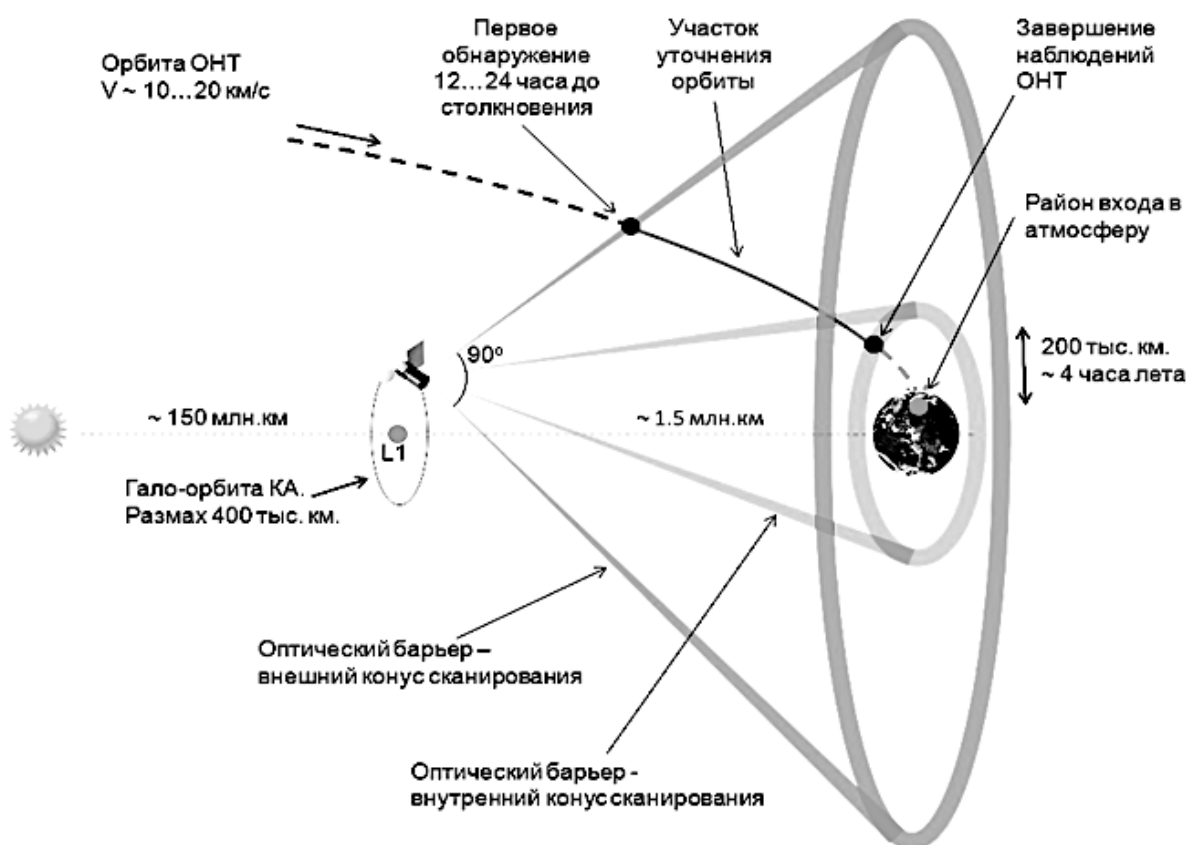


Рис. 2.21. Схема работы космического комплекса СОДА.

ратов, разнесенных по гало-орбите вокруг точки L1. Такая конфигурация позволит использовать режим триангуляции и существенно увеличит точность определения орбиты ОНТ, а, значит, и точность определения точки входа в атмосферу, что важно, если орбита ОНТ столкновительная. Проработка проекта продолжается, в частности, в рамках программы «Млечный путь».

В текущей версии проекта предлагается в комплекс научной аппаратуры включить приборы для исследования по гелиофизической тематике, в частности, для мониторинга параметров солнечного ветра.

## 2.4. Об оценке рисков, связанных с АКО

Как указано в разделе 1.1, риск – это конкретная количественная оценка, определяемая как сочетание вероятности реализации угрозы и тяжести ее последствий. В случае АКО можно оценить

риск такой формулой с несколько шуточным математическим наполнением:

$$\text{риск} = \text{вероятность события} \times \text{последствия} \quad (2.5)$$
$$0 \times \infty = ? \quad \text{☺}$$

Здесь 0 здесь символизирует сложность определения обычно весьма малой величины – вероятности столкновения, а  $\infty$  – очень высокую стоимостную оценку последствий. Определённый таким образом в количественном выражении риск может быть представлен в виде специальных шкал (см. в разделе 2.4.3 описание Туринской и Палермской шкал).

Перечислим основные задачи, которые нужно решить при оценке рисков и последующего принятия решений:

- расчет вероятности столкновения;
- оценка последствий;
- выработка критериев для принятия решений.

Решение первой задачи – это работа, главным образом, для астрономов (небесных механиков). В решении второй задачи предполагается участие геофизиков, физиков, биологов, специалистов по экономике, массовой психологии и другим социальным наукам и т.д. Выработка критериев для принятия решений – это прерогатива МЧС и других руководящих органов. В любом случае, надежная и своевременная оценка степени риска конкретного события (столкновения) – главный результат, который обязана дать наука, занимающаяся проблемой АКО. Обсудим первые две задачи, которые ближе к научным интересам авторов.

#### 2.4.1. Оценка вероятности столкновения

Движение ОСЗ и особенно ПОО тщательно рассчитывается, с тем, чтобы оценить вероятность столкновений с Землёй. Конечно, подходы классической небесной механики, прошедшие проверку в течение столетий, используются в полном объеме, но даже в этой области возможны очень существенные нововведения, такие как учет тонких физических эффектов и дальнейшее разви-

тие теоретических и вычислительных методов. Пример – сравнительно недавний «бум», связанный с массовым осознанием существенности эффекта Ярковского для эволюции орбит астероидов. Ещё одна тема – так называемые зоны резонансного возврата, стала особенно актуальной в связи с исследованиями эволюции орбит малых тел в результате близких прохождений в окрестностях планет. Весьма сложна задача расчета орбит комет из-за множества дополнительных плохо рассчитываемых негравитационных факторов (например, трудно с высокой точностью рассчитать действие газовых потоков, уходящих из ядра испаряющейся кометы, на движение ядра). В любом случае для надежного и заблаговременного прогнозирования нужны и точные и равномерно распределенные наблюдения, и адекватные, очень детальные физические модели, и, конечно, надёжные алгоритмы. Работы в этом направлении немало. В этом разделе мы лишь опишем общие принципы расчета вероятности столкновения, используя элементы из детального анализа, приведённого в гл.7 книги [2.1].

При оценивании вероятности столкновений как естественных так и искусственных космических тел друг с другом важную роль играет понятие плоскости цели. Плоскость цели – это плоскость, проходящая через центр планеты-мишени перпендикулярно к вектору невозмущенной скорости ударника относительно планеты-мишени. Когда астероид имеет тесное сближение с большой планетой, его гелиоцентрическая орбита начинает постепенно меняться под действием тяготения планеты. Внутри сферы действия планеты траектория астероида относительно планеты очень близка к гиперболе (см. рис. 2.22).

Напомним, что областью действия, или сферой действия, меньшего тела массой  $m_2$  (например, Земли) относительно большего тела  $m_1$  (например, Солнца) называют область пространства, в которой выполняется условие:

$$\frac{|\Delta g_2|}{|g_2|} \leq \frac{|\Delta g_1|}{|g_1|}, \quad (2.6)$$

где  $g_1$  – ускорение, которое получает пробное тело малой массы (например, астероид) при движении в центральном поле тела  $m_1$ ,  $\Delta g_1$  – возмущающее ускорение, которое получает астероид из-за наличия притягивающего тела  $m_2$ ,  $g_2$  – ускорение, которое получает астероид при движении в центральном поле тела  $m_2$ ,  $\Delta g_2$  – возмущающее ускорение, которое получает астероид из-за наличия притягивающего тела  $m_1$ . Для Земли радиус сферы действия 929 тыс. км.

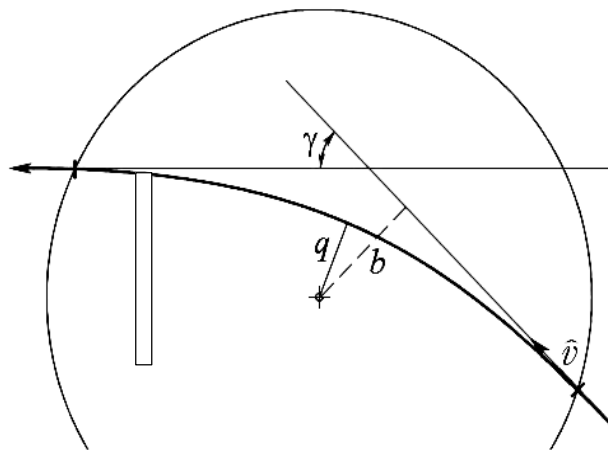


Рис. 2.22. Траектория движения астероида относительно Земли в пределах ее сферы действия.

Относительная скорость астероида  $\hat{v}$  на входе в сферу действия равна разности гелиоцентрических скоростей астероида и Земли. Обогнув Землю, на выходе из сферы действия астероид имеет ту же самую по величине относительную скорость  $\hat{v}$ , но её направление изменяется на некоторый угол  $\gamma$ . Расстояние от центра Земли до этой асимптоты называется прицельным расстоянием  $b$ . Прицельное расстояние связано с минимальным расстоянием гиперболы от центра Земли  $q$  следующим соотношением:

$$b^2 = q^2 \left( 1 + \frac{v_\infty^2}{\hat{v}^2} \right), \quad (2.7)$$

где  $v_\infty$  – параболическая скорость для Земли.

Если в формулу (7) подставить  $q$ , равное радиусу Земли, то  $b$  будет равно прицельному расстоянию, при котором траектория астероида коснется поверхности Земли. Соответствующее значение прицельного расстояния называется радиусом захвата. При решении вопроса о реальности столкновения следует использовать не радиус Земли, а её радиус захвата.

На первом этапе решения задачи об оценке вероятности столкновения АСЗ с Землёй строится номинальная орбита астероида, полученная путем улучшения предварительной орбиты по дополнительным наблюдениям с помощью метода наименьших квадратов. При этом элементы номинальной орбиты определяются со среднеквадратичными ошибками  $\sigma_i$ . В пространстве орбит номинальная орбита окружена областью возможных орбит. Эта область может быть квалифицирована как область неопределённости начальных условий движения. Фактическая орбита тела, которая нам неизвестна, находится где-то внутри области неопределённости. Тело на возможной орбите называют виртуальным (возможным) астероидом. В линейном упрощении можно считать, что область пространства, занятая виртуальными астероидами в окрестности сближения астероида с Землёй, представляет собой эллипсоид. Центр этого (доверительного) эллипсоида не обязательно лежит на номинальной орбите. В первом приближении нас интересует проекция этого эллипсоида на плоскость цели. Эта область ограничена эллипсом. Плоскость цели проходит через центр Земли, перпендикулярно к вектору геоцентрической скорости астероида  $\dot{\mathbf{r}}$ . Задача сводится к тому, чтобы найти координаты центра эллипса на плоскости цели, его полуоси и оценить расположение эллипса относительно Земли.

Возможны следующие три случая взаимного расположения Земли и эллипса на плоскости цели:

- эллипс расположен на некотором расстоянии от окружности с радиусом, равным радиусу захвата Земли (рис. 2.23а), что практически исключает возможность столкновения астероида с Землёй;
- кружок с радиусом, равным радиусу захвата, находится внутри эллипса (рис. 2.23б). Вероятность столкновения мо-

жет быть рассчитана, исходя из отношения площади кружка к площади, ограниченной эллипсом. Для повышения точности прогноза можно учесть неодинаковую вероятность попадания виртуальных астероидов в различные точки области, ограниченной эллипсом;

- площадь, ограниченная эллипсом, частично покрывает область захвата Земли (рис. 2.23в). Этот случай практически не отличается от предыдущего. Вероятность столкновения рассчитывается с учётом отношения перекрывающейся области ко всей площади, ограниченной эллипсом.

Задача, конечно, сложнее, чем мы схематично её описали. Она может иметь нелинейный характер по многим причинам. Доверительный эллипсоид уже в начальный момент  $t_0$  может недостаточно хорошо описывать область возможных начальных условий, поскольку само распределение ошибок наблюдений может не подчиняться закону

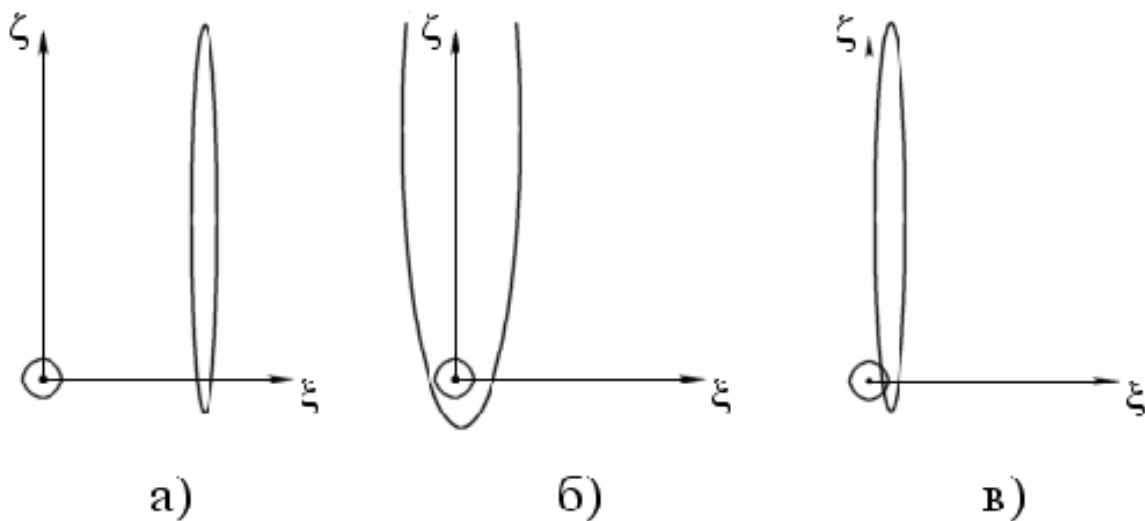


Рис. 2.23. Возможные взаимные расположения эллипсов ошибок и кружка радиусом, равным радиусу захвата, в плоскости цели.

Гаусса. Проекция доверительного эллипсоида на плоскость цели в момент  $t$  сближения с Землёй, отдаленный от  $t_0$  на десятилетия, вытягивается в очень узкую область, которая к тому же искривляется в соответствии с кривизной земной орбиты. По всем этим причинам линейный анализ задачи становится неадекватным, и требует-

ся применение более тонких методов анализа (к настоящему времени предложено два таких метода: метод Монте-Карло и метод линии вариации).

#### 2.4.2. Оценка последствий возможного столкновения

В табл. 2.1 указаны последствия столкновений что называется «двумя словами». На самом деле эта тема – анализ последствий столкновений ОНТ с Землёй – большое направление исследований. Читателям, заинтересовавшимся этой темой на глубоком уровне, можно порекомендовать очень содержательную монографию [2.19]. Четвертая глава в [2.2] также посвящена этой теме. Здесь мы приводим лишь краткие сведения.

Теоретические исследования падений космических объектов разных размеров [2.20] показывают, что при падении космического тела на Землю реализуется один из четырех сценариев (в порядке уменьшения размеров тела):

- кратерообразующий удар (когда космическое тело, даже сильно раздробленное, достигает поверхности Земли и образует кратер);
- поверхностный гигантский болид (ГБ) или поверхностный «метеорный взрыв» (когда высокоскоростная струя, состоящая из мелких фрагментов и паров метеороида и нагретого в ударной волне воздуха, ударяет по поверхности Земли, не образуя кратера);
- воздушный ГБ или воздушный «метеорный взрыв» (когда продукты полностью разрушенного и испаренного метеороида тормозятся в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметные разрушения и пожары);
- обыкновенные метеорные явления (которые могут наблюдаться с Земли и из космоса, но не оставляют заметных следов на поверхности Земли).

Здесь «взрыв» космического тела в атмосфере означает, что космическое тело, разрушаясь, плавясь и испаряясь, тормозится в атмосфере и выделяет большую часть своей кинетической энергии

в виде тепловой энергии в некотором ограниченном объеме атмосферы за короткое время. Обычно этот термин употребляется применительно к крупным телам, кинетическая энергия которых сравнительно велика, порядка 1 кт ТНТ и более.

Четких границ между режимами нет, возможны промежуточные сценарии. Реализацию конкретного сценария определяют как размер ударника и его скорость, так и его плотность и состав, а также угол входа в атмосферу. Зависимость результата столкновения от размера ударника, угла входа в атмосферу и состава (плотности) ударника показана на рис. 2.24 (взяты из [2.2]). Ударники – кометы и астероиды – здесь отличаются прежде всего плотностью. Плотность кометного ядра в несколько раз меньше плотности астероида.

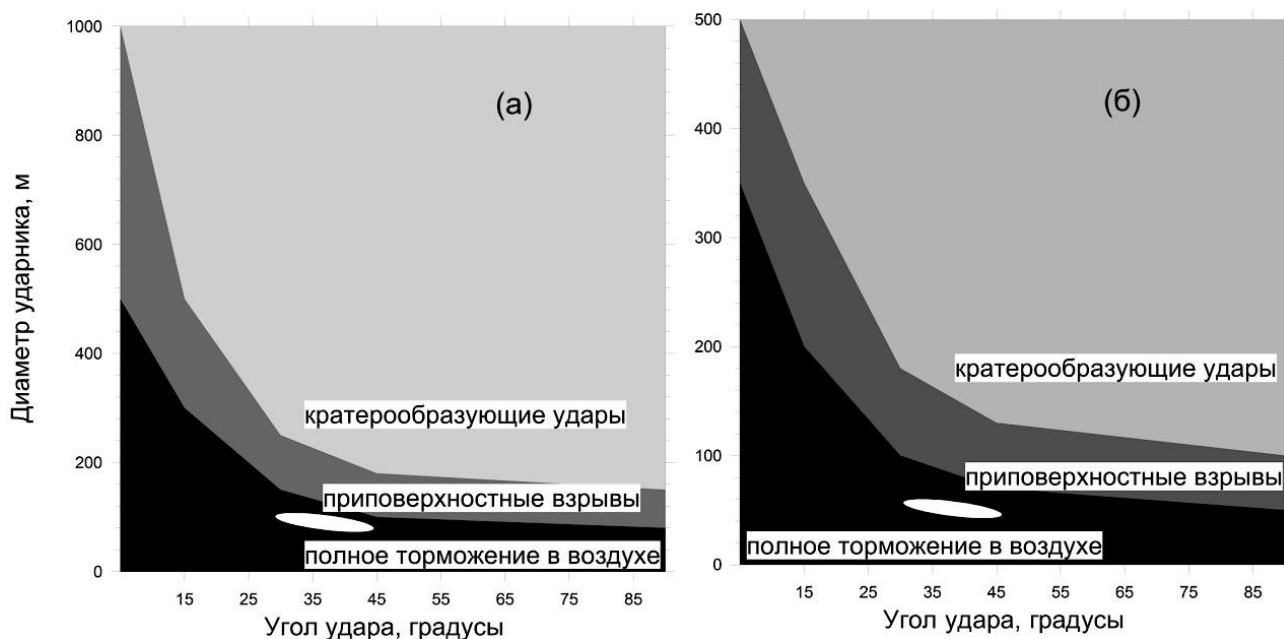


Рис. 2.24. Результаты ударов комет (а) и астероидов б) Светлая область – удары производят кратеры; область с тонировкой средней плотности – кратера нет, энергия тела выделяется у поверхности; тёмная – тело полностью тормозится в воздухе. Светлый эллипс показывает область параметров тел, которые могли вызвать Тунгусское событие 1908 г.

Поскольку скорости столкновений варьируются по величине относительно умеренно по сравнению с диапазоном масс ударников, масса ударника – главный фактор, определяющий энергию и



последствия столкновения. Меняется и относительная роль поражающих факторов. Рассмотрим поражающие факторы (см. [2.2]).

В зависимости от места выделения основной энергии ОНТ при столкновении возможна реализация различных наборов поражающих факторов.

При полёте и торможении тела в атмосфере:

- ударная волна;
- тепловое излучение и пожары;
- электромагнитные возмущения;
- сейсмические эффекты;
- загрязнение атмосферы парами и пылью от разрушающегося в атмосфере небесного тела.

При ударе о поверхность Земли:

- изменение рельефа (образование кратера);
- ударная волна в атмосфере;
- тепловое излучение и пожары;
- сейсмические эффекты;
- образование цунами;
- выброс в атмосферу воды; выброс пыли; климатически активных и/или токсичных газов;
- электромагнитные возмущения;
- акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли;
- опасные химические реакции в атмосфере.

На поздних стадиях столкновения возможны высокоскоростные горячие выбросы (т. н. плюмы) в атмосферу в направлении, обратном направлению входа, которые также могут вызвать:

- электромагнитные возмущения;
- тепловое излучение и пожары;
- акустико-гравитационные волны.

При прочих равных условиях различные поражающие факторы имеют различную площадь поражения. В табл. 2.3 приведены категории площади поражения (локальный, региональный, глобальный) в зависимости от трёх интервалов диаметра ударника.

Конечно, все эти сведения носят полукачественный характер. Если говорить о более точном расчете последствий конкретного

Таблица 2.3. Характеристики поражающих факторов при различных типах столкновений.

Диаметр тела	30 –300 м	300м –3 км	> 3 км
Пролет тела в атмосфере			
Ударная волна	локальный	региональ- ный	региональный
Тепловое излучение и пожары	локальный	региональ- ный	региональный
Электромагнитные возмущения	локальный	региональ- ный	региональный
Образование кратера			
Изменение рельефа	локальный	локальный	региональный
Сейсмические эф- фекты	региональный	региональ- ный	глобальный
Образование плюма и ударной волны в атмосфере	региональный	региональ- ный	глобальный
Выброс пыли	региональный	глобальный	глобальный
Выброс активных и/или токсичных га- зов	локальный	глобальный	глобальный
Электромагнитные возмущения	региональный	глобальный	глобальный
Падение в океан/море			
Выброс воды	локальный	региональ- ный	глобальный
Образование цу- нами	региональный	региональ- ный	глобальный
Возвращение высокоскоростных выбросов (плюмов) в атмосферу			
Акустико-гравита- ционные волны	региональный	региональ- ный	глобальный
Электромагнитные возмущения	региональный	региональ- ный	глобальный
Тепловое излучение и пожары	локальный	региональ- ный	региональный

события, то тут не так все просто. Есть довольно ясные оценки последствий мгновенного выделения гигантских энергий в малом объеме (попросту говоря, мощных взрывов), проверенные на натурных экспериментах. Речь идет, конечно, об испытаниях термоядерных бомб, самая мощная из которых («Кузькина мать») имела зарядовый эквивалент около 60 мегатонн ТНТ. Но если говорить об АКО, то задача определения последствий столкновения представляется более сложной. Во-первых, речь может идти об энергиях, несравненно бóльших, а, во-вторых, появляются дополнительные параметры и факторы, влияние которых оценить непросто, так как при конкретной угрозе столкновения расчет риска всегда индивидуален. Он должен учитывать много конкретных обстоятельств: свойства данного тела, условия входа в атмосферу, вероятное место падения (рельеф суши, глубину водоема (если падение в море)), дату и время события и ряд других важных обстоятельств экономического и социального плана.

Пока что не существует общепринятых стандартов и методик для надёжных расчетов риска, но необходимость этой работы очевидна, и она ведется.

Например, в работе [2.21] детально рассчитаны последствия падения 300 м тела на Землю. Некоторые выводы на первый взгляд кажутся парадоксальными. На рис. 2.25 показаны распределения максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под различными углами к поверхности. Как видно из рисунка, при вертикальном ударе область избыточного давления намного меньше, чем при косом ударе.

Для первичной (качественной) оценки последствий интересующимся читателям рекомендуем воспользоваться одним из специально разработанных калькуляторов – программ расчета последствий, позволяющих на входе задавать различные параметры ударника и условия столкновений. С нашей точки зрения наиболее удачный калькулятор разработан в ИДГ РАН (см. <http://asteroidhazard.pro/#/c> ).

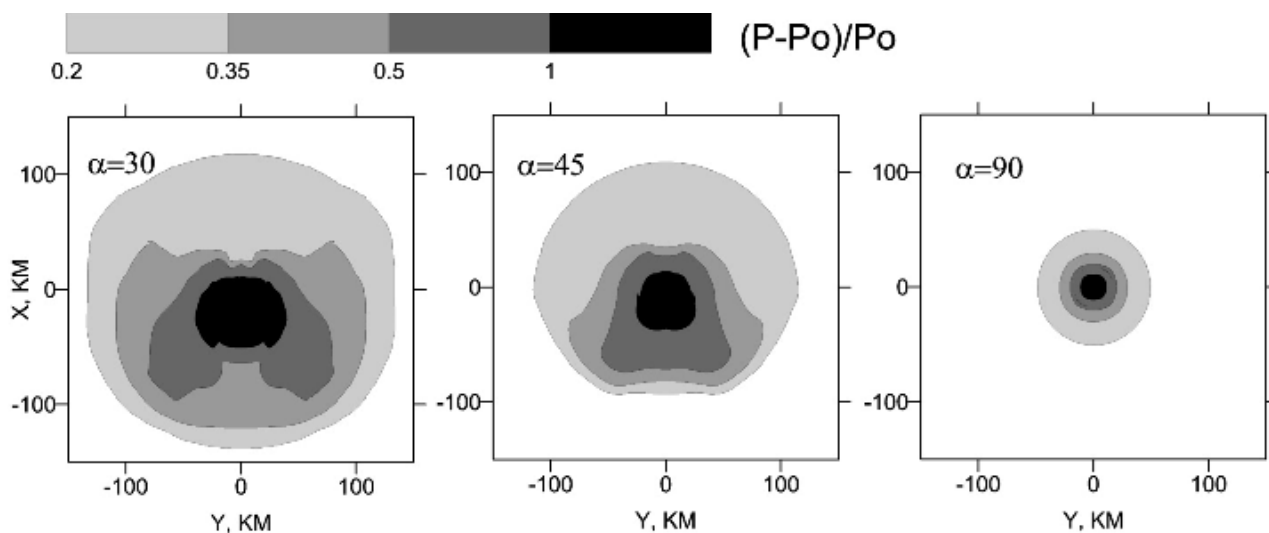


Рис. 2.25. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под разными углами к поверхности. В случае косоуго удара астероид движется сверху (из области  $X > 0$ ) вниз и в точке  $X=0$ ,  $Y=0$  касается поверхности.

#### 2.4.3. Туринская и Палермская шкалы для оценивания угрозы столкновения Земли с астероидами и кометами

Туринская шкала напоминает принятую в ряде стран шкалу угроз государственного масштаба («оранжевая», «красная» и т.д.). Эта шкала наиболее простая и применяется, в основном, в целях информирования общества. Туринская шкала (см. рис. 2.26) построена по типу шкал Рихтера для оценки землетрясений или шкалы силы ветра по Бофорту. Оценка (категоризация) угрозы по Туринской шкале обязательно должна сопровождаться указанием момента соответствующего сближению космического тела с Землёй (шкала разработана для оценки событий на интервале примерно столетия от текущей даты).

В основу построения шкалы положен учет двух основных факторов, определяющих оценку угрозы: вероятности столкновения и кинетической энергии падающего тела. Кинетическая энергия столкновения, выраженная в мегатоннах тротилового эквивалента, меняется в пределах от 1 Мт до  $10^8$  Мт. Нижний предел со-

ответствует телам размером около 20 м. Все события с меньшей энергией получают по Туринской шкале оценку 0. Верхний предел определяется величиной



Рис. 2.26. Туринская шкала для оценивания угрозы столкновений астероидов и комет с Землёй в ближайшие примерно 100 лет.

энергии, приведшей к массовому вымиранию видов живых существ на рубеже мезозойской и кайнозойской эр в истории Земли («гибель динозавров»). Таким образом, угроза практически любого предстоящего тесного сближения астероида или кометы с Землёй может быть охарактеризована указанием даты сближения и присвоением ему категории по Туринской шкале.

Упрощения, с которыми построена Туринская шкала, делают её нечасто используемой в научных исследованиях. Отметим несколько таких упрощений:

1. Туринская шкала целочисленная. Это облегчает восприятие оценки. Но события, относящиеся к одной и той же категории по Туринской шкале, фактически, могут весьма сильно отличаться друг от друга. Например, два события, имея одинаковую вероятность, могут на два-три порядка отличаться по

энергии столкновения. С другой стороны, в окрестности разделительных линий или узловых точек близкие события отвечают целому набору различных категорий шкалы;

2. любое событие с энергией, меньшей 1 Мт, согласно Туринской шкале, имеет категорию 0, т. е. не заслуживает внимания. Но Челябинское событие 15 февраля 2015 г изменило наши представления о минимальном пороге размеров ОНТ!
3. Туринская шкала не зависит непосредственным образом от времени до предстоящего сближения. Вне зависимости от того, сколько времени осталось до сближения, несколько месяцев или несколько десятков лет, по Туринской шкале это событие получает одну и ту же оценку. Фактор времени влияет лишь опосредствованно, поскольку более близкое событие привлекает, естественно, больше внимания.

Таким образом, для более детального анализа потребовалась другая шкала. Она имеет название Палермской. Палермская шкала выстраивается в соответствии со значением десятичного логарифма  $P$  относительного («нормализованного») риска  $R$ ,

$$P = \log_{10} R , \quad (2.8)$$

$$R = P_i / (f_B \times \Delta T) , \quad (2.9)$$

где  $P_i$  – вероятность столкновения для конкретного события,  $\Delta T$  – время в годах до ожидаемого события,  $f_B$  – количество столкновений в год с энергетикой не менее  $E$  (в мегатоннах ТНТ), определяемое как

$$f_B = 0.03 \times E^{-4/5} . \quad (2.10)$$

Величина  $f_B$  описывает оценку частоты падения на Землю тел с энергией, большей или равной заданному значению  $E$ , осреднённую на длительном интервале времени.

Отсылая читателя за деталями к главе 9 книги [2.1], суммируем: нормализованный риск  $R$  – это вероятность конкретного события (столкновения тела с Землёй), взвешенная по отношению к средней вероятности столкновения с Землёй тел такой же самой

или большей энергии за время, оставшееся до предполагаемого столкновения.

Если астероид или комета имеют на рассматриваемом интервале серию сближений с Землёй, вычисляется совокупный (кумулятивный) нормализованный риск, который сопоставляется с фоновым риском, исчисляемым за время до конца рассматриваемых событий.

Исходя из определения Палермской шкалы, можно отметить, что событие (столкновение с телом, несущим некоторую энергию), получающее оценку  $P = 0$ , представляет такую же угрозу, которую создаёт естественный фон, т. е. столкновения с телами такой же или большей энергии за всё время до столкновения. Значение шкалы, равное -2, соответствует событию, представляющему в сто раз менее опасное, а оценка, равная +3, означает событие в тысячу раз более опасное по сравнению с вероятными столкновениями Земли со случайными телами такой же или большей энергии за время, остающееся до события.

Как связаны друг с другом Туринская и Палермская шкалы? Это разные шкалы. Не существует правила перехода от одной шкалы к другой, но если событие имеет вероятность большую, чем фоновые события за промежуток времени до ожидаемого (сближения (столкновения)), то и по Палермской и по Туринской шкале они имеют оценку, превосходящую 0. С другой стороны, события, имеющие оценку 1 по Туринской шкале, часто по Палермской шкале характеризуются отрицательными значениями  $P$  (см., например, сайт JPL <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/> ).

Необходимо понимать, что оценки риска, как по Туринской, так и по Палермской шкале, являются довольно приближёнными.

## 2.5. Методы парирования угрозы столкновений

Важнейшей составляющей стратегии противодействия является комплекс мер по парированию угрозы столкновений и по уменьшению ущерба. Уменьшение ущерба – очень многоплановая тема, она довольно подробно на реальных примерах освещена в главе 5 книги [2.2]. Здесь же мы кратко остановимся только на теме непосредственного противодействия (т. е. недопущения ката-

строфического столкновения).

В России и во всём мире (см., например, [2.22]) интенсивно разрабатываются методы активного парирования АКО. Есть два вида решений – отклонение угрожающего тела (т. е. заблаговременное изменение его орбиты с тем, чтобы тело миновало нашу планету) и разрушение этого тела.

Методы отклонения рассматриваются как более предпочтительные. Один из вариантов метода (кинетический ударник) был успешно испытан в 2022 г. эксперименте DART. Появилось много материалов по результатам эксперимента (см., например, [https://en.wikipedia.org/wiki/Double\\_Asteroid\\_Redirection\\_Test](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_Asteroid_Redirection_Test)).

Проблема прямого противодействия пока малоизучена. Главная неопределённость – плохое априорное знание свойств угрожающего тела и, соответственно, неуверенность в оценке последствий применения оружейных методов разрушения.

Можно резюмировать, что предложено множество способов решения задачи активного парирования АКО, однако большинство предложений страдает недостатком надежных количественных оценок. В первую очередь это касается оценок практической реализуемости активных средств противодействия на базе существующего или хотя бы в какой-то степени прогнозируемого развития технических средств в обозримом будущем.

Кажется разумным принять, что любые предложения и исследования, относящиеся к решению проблемы противодействия астероидной опасности, должны быть полностью подчинены трем основным принципам реализации противодействия космической угрозе, а именно:

- результат операции противодействия должен прогнозироваться однозначно и гарантировать безопасность населения Земли;
- операция противодействия должна содержать как ее неотъемлемую часть возможность исправления ошибок, могущих появляться по ходу проведения операции устранения угрозы;
- планирование операции противодействия должно исходить из технологических возможностей существующей



космической техники и перспектив её развития в течение ближайших десятилетий.

### 2.5.1. Об изменении орбиты (уводе) опасного небесного тела

Если время упреждения велико (как правило, не менее десяти лет), то по современным представлениям наиболее целесообразным является увод тела с орбиты столкновения. Основные баллистические аспекты изменения орбит ОНТ изложены в главе 10 книги [2.1].

Обсуждается множество способов. Наиболее проработаны следующие методы получения импульса увода:

- поверхностный или надповерхностный взрыв;
- ударно-кинетическое воздействие массивного тела, выведенного в космос и сталкивающегося с астероидом;
- гравитационный увод;
- использованием малой реактивной тяги, создаваемой, например, электрореактивной двигательной установкой;
- нагревом и испарением лазерным или ионным пучком определённого небольшого участка поверхности астероида.

В последнее время как вариант способа ударно-кинетического воздействия массивного тела обсуждается возможность направления на ОНТ малого астероида [2.23]. «Изюминка» предложения состоит в том, чтобы изменять орбиту малого астероида не в прямую, т. е. за счёт длительной и интенсивной работы установленного на отклоняемом астероиде ракетного двигателя (способ очень затратный и малоэффективный), а подобрать из множества малых астероидов ударник, находящийся на «критической» орбите. За счёт малого изменения (несколько м/с) скорости этого астероида, его нужно перевести на орбиту, позволяющую использовать гравитационный маневр около Земли. В результате астероид-снаряд может существенно изменить направление скорости и перейти на траекторию столкновения с ОНТ.

### 2.5.2. О дезинтеграции (разрушении) опасного небесного тела

При малом времени упреждения и небольшой массе тела

можно добиться его дробления на части, не представляющие угрозы, например, с помощью инерционных механических рассекателей. В случае большой массы тела единственным методом противодействия является его дисперсия с помощью (термо)ядерных взрывов. При размерах астероида более нескольких сотен метров способов защититься от такой угрозы пока не существует. Использование указанных методов требует серьезной предварительной проработки. Пока что остается очень большая неопределённость в результатах воздействия.

В монографии [2.24] приводятся результаты концептуальных исследований по определению параметров и схем применения ракетной составляющей системы противоастероидной защиты Земли. Показано, что решить эти задачи (не все) возможно путем разработки и применения на существующих и перспективных ракетных комплексах универсального ударного космического аппарата, содержащего в своем составе несколько ударных модулей, и космического аппарата-разведчика, обеспечивающего в случае необходимости уточнение состава и характеристик ОНТ.

Обсуждение методов противодействия ведется весьма активно. Ориентировочные режимы применимости четырех основных способов гражданской обороны, проиллюстрированы на рис. 2.27, адаптированном из [2.25].

## **2.6. Над чем работать**

Перечислим некоторые направления работы, в которых, по мнению авторов, роль астрономов должна быть весьма высокой или даже определяющей (список, конечно, неполон!):

- разработка эффективных астрономических технологий обнаружения и мониторинга ОСЗ и особенно ПОО;
- исследование динамических и физико-химических свойств ОСЗ и, особенно, ПОО;
- выявление механизмов воспроизведения популяция АСЗ из астероидов Главного пояса;
- разработка эффективных методов прогнозирования движения ОСЗ и оценки рисков столкновений;

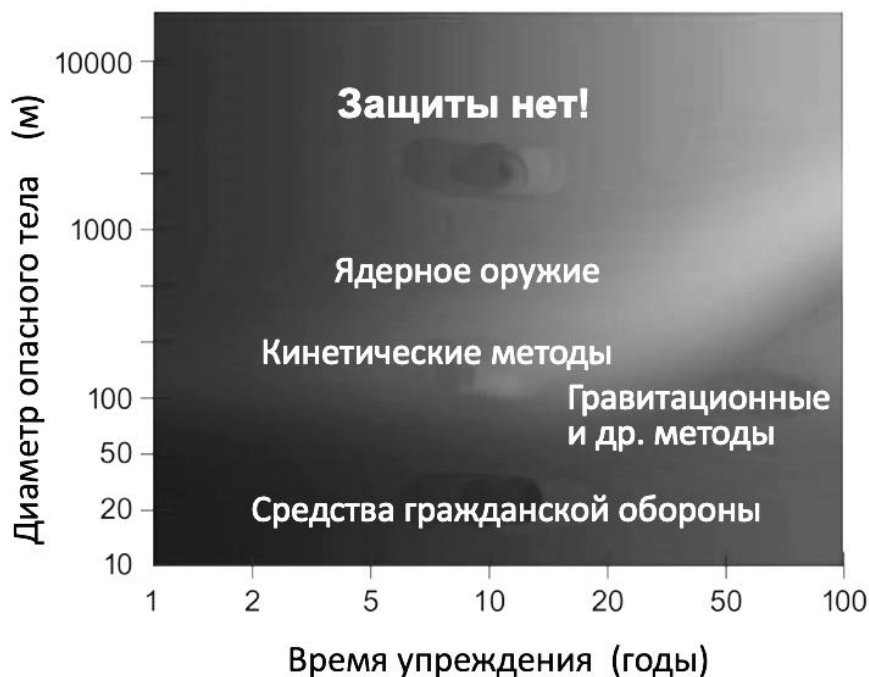


Рис. 2.27. Режимы применения основных способов противодействия в зависимости размеров ОНТ и времени предупреждения.

- фундаментальные аспекты изучения возможных мер предотвращения столкновения ОСЗ с Землёй и уменьшения ущерба;
- развитие международного сотрудничества (например, в рамках сети IAWN).

### *Литература к разделу*

- 2.1 Астероидно-кометная опасность / Под редакцией Б.М.Шустова и Л.В.Рыхловой, М: Физматлит. 384 с., 2010.
- 2.2 Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Под редакцией В.А.Пучкова. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 272 с., 2015.
- 2.3 National preparedness strategy for near-earth object hazards and planetary defense. National Science & Technology Council, 2023  
<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/04/2023-NSTC-National-Preparedness-Strategy-and-Action-Plan-for-Near-Earth-Object-Hazards-and-Planetary-Defense.pdf>
- 2.4 Neukum G., Ivanov B. A., Hartmann W. K. The Comparison of Size-Frequency Distributions of Impact Craters and Asteroids and the Planetary Cratering Rate, in Proceedings of the EGS General Assembly Conference, p. 4075., 2002.

- 2.5 Золотарёв Р.В., Шустов Б.М. О динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей // *Астрономический журнал*, Т. 98, No 7, С. 1–10, 2021.
- 2.6 Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А., *Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г.* // *Астрономический вестник*, Т. 47. No. 4, С. 262, 2013.
- 2.7 Granvik M., Morbidelli A., Jedicke R., Bolin B., Bottke W. F., Beshore E., Vokrouhlicky D., Michel P. Debaised estimates for NEO orbits, absolute magnitudes, and source regions, // *Icarus*, 312, 181, 2018.
- 2.8 Pravec P., Harris A. W., Michalowski T. Asteroid Rotations, Asteroids III, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, p.113-122
- 2.9 Lupishko D. F., Teleusova I. N. Axial Rotation of Near-Earth Asteroids: The Influence of the YORP Effect // *Solar System Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 20–23, 2013.
- 2.10 Edward L. Wright E.L., Mainzer A., Masiero J., Grav T., Bauer J, The albedo distribution of near earth asteroids // *The Astronomical Journal*, 152:79 (4pp), 2016.
- 2.11 Шустов Б. М., Нароенков С. А., Емельяненко В. В., Шугаров А. С. Астрономические аспекты построения системы обнаружения мониторинга опасных космических объектов // *Астрономический вестник*, Т.47, No 4, С. 312–320, 2013.
- 2.12 Золотарёв Р.В., Шустов Б.М. Динамическая шкала АСЗ: зависимость от орбитальных параметров // *Астрономический журнал*, Т.98, том 98, № 7, с. 1–10, 2021.
- 2.13 Morbidelli A., Bottke J, Froeschlé W. F., C., Michel P. Origin and Evolution of Near-Earth Objects Asteroids III, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, p.409-422, 2002.
- 2.14 Granvik, M., Morbidelli, A., Vokrouhlický D., Bottke, W., F., Nesvorný, D. and Jedicke, R. Escape of asteroids from the main belt // *A&A* 598, A52, 2017.
- 2.15 Atkinson H., Tickell C., Williams, D. (2009). Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects, 2009.
- 2.16 Нароенков С.А., Шустов Б.М., Емельяненко В.В. О длине дуги наблюдений малого тела Солнечной системы, достаточной для классификации его как опасного // *Космич. исслед.* 2013, Т. 51, No. 5, С. 372–379.

- 2.17 Reddy V., Kelley M.S., Farnocchia D., Ryan W.H., et al. Near-Earth asteroid 2012 TC4 observing campaign: Results from a global planetary defense exercise // *Icarus*, Volume 326, p. 133-150, 2019.
- 2.18 Шустов Б.М., Шугаров А.С., Нароенков, С.А., Прохоров М.Е. Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к проблеме астероидно- кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрон. Ж.* 2015. Т. 92. №10, С. 867–880.
- 2.19 Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. Адушкина В.В., Немчинова И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 310 с., 2005.
- 2.20 Шувалов, В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // *Астрономический вестник*. Т. 41. No 3. С. 241–251. 2007.
- 2.21 Shuvalov V.V. , Svetsov V.V. , Artem'eva N.A., Trubetskaya I.A., Popova O.P., Glazachev D.O. Apophis: Evaluating the impact hazards of such bodies // *Solar System Research*, V.51. P.44., 2017.
- 2.22 National Research Council. Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- 2.23 Эйсмонт Н. А., Боярский М. Н., Ледков А. А., Назиров Р. Р., Данхэм Д., Шустов Б. М. О возможности наведения малых астероидов на опасные небесные объекты с использованием гравитационного маневра // *Астрономический вестник*, том 47, № 4, с. 352–360, 2013.
- 2.24 Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противастероидной защиты Земли. М.: Машиностроение, 335 с., 2013.
- 2.25 Perna D., Barucci M.A., Fulchignoni M., The near-Earth objects and their potential threat to our planet // *The Astronomy and Astrophysics Review*, Volume 21, article id.65, 2013.
- 2.26 Nesvorný D., Deienno R., Bottke1 W.F. NEOMOD: A New Orbital Distribution Model for Near-Earth Objects // *The Astronomical Journal*, 166:55 (30pp), 2023.

### **3. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА**

Космической погодой называют совокупность явлений, происходящих в верхних слоях земной атмосферы, в ионосфере, в магнитосфере и околоземном космическом пространстве. Явления космической погоды вызываются процессами, происходящими на Солнце и в межпланетном пространстве, которые в конечном итоге влияют на естественную земную среду. Космическая погода не представляет прямой опасности для людей на Земле, но она влияет на ряд современных критически важных технологий. Негативное воздействие на энергетическую инфраструктуру, транспорт, радиосвязь, спутники наблюдения, навигации и связи и т. д. приводит к снижению надёжности критически важных систем с потенциальным влиянием на безопасность людей и на глобальную экономику.

#### **3.1. Солнце и космическая погода**

Солнце – активная звезда, на его поверхности есть пятна (тёмные и более холодные области) и факелы (более горячие и яркие области). В активности этих структур определяющую роль играют магнитные поля. Иногда эти структуры теряют устойчивость. Под действием магнитного поля происходит неожиданное сжатие солнечной плазмы, образуется плазменный жгут, который может достигать в длину десятков или сотен тысяч километров, что приводит к взрыву – солнечной вспышке. Солнечная плазма в этой области может нагреваться до температур порядка  $10^6$  К. Здесь получают дополнительную энергию и значительно ускоряются потоки электронов, протонов и других заряженных частиц. Усиливается оптическое, рентгеновское, гамма- и радиоизлучение. Солнечные вспышки часто, но не всегда, сопровождаются выбросом корональной массы. Выброс вещества приобретает скорость до

1000 км/с, вещество покидает поверхность Солнца и улетает в межпланетное пространство. Энерговыделение в мощной солнечной вспышке может достигать  $6 \cdot 10^{32}$  эрг, это составляет около 1/6 энергии, выделяемой Солнцем за секунду.

Во время максимумов солнечной активности частота корональных выбросов массы достигает трёх за сутки, тогда как в периоды спокойного Солнца эта частота может снижаться до одного выброса в 5 суток. Выброс распространяется в конусе с углом раствора примерно  $60^\circ$ . Типичный корональный выброс достигает орбиты Земли за 3 суток, быстрые выбросы от самых мощных вспышек – за 1 сутки.

В обычном состоянии размеры магнитосферы Земли в направлении Солнца определяются её взаимодействием с потоком солнечного ветра, непрерывно испускаемого Солнцем. На орбите Земли плотность солнечного ветра составляет  $1\text{--}10 \text{ см}^{-3}$ , а скорость движения достигает 300–700 км/с. Столкновение коронального выброса с магнитосферой Земли вызывает сильное возмущение – геомагнитную бурю (шторм). Именно с геомагнитными штормами связано воздействие космической погоды на Землю.

Таким образом, космическая погода на Земле вызывается следующей цепочкой событий: вспышка на Солнце – корональный выброс массы – геомагнитный шторм. Эти процессы иллюстрируются рисунком 3.1 .

### **3.2. Воздействие космической погоды на людей и земные технологии**

#### Воздействие космической погоды на людей.

Космическая погода по большей части не может наблюдаться или ощущаться непосредственно человеком. Исключением являются полярные сияния. Известен комплекс симптомов, называемых метеозависимостью, который состоит в болезненной реакции организма человека на изменения погоды и состояния окружающей среды, в том числе возмущений геомагнитного поля. Метеозависимость проявляется в виде головных болей, мигрени, тошноты, слабости и иных болезненных ощущений. Обычно метео-

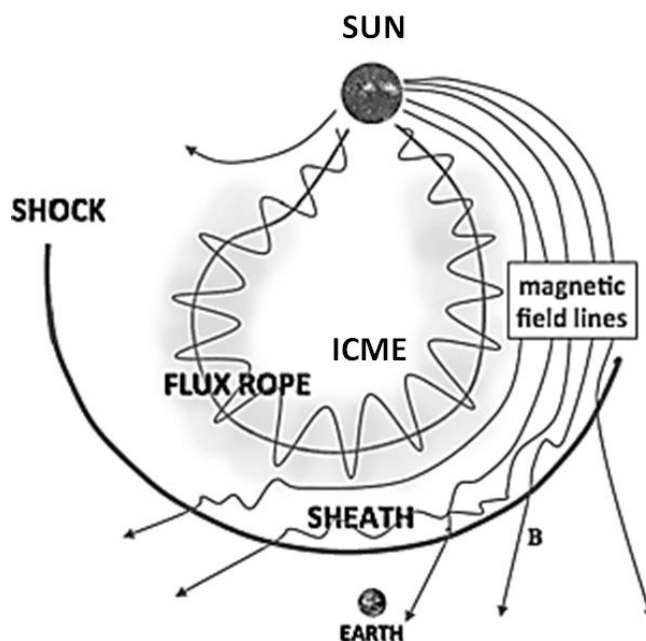


Рис. 3.1 Взаимодействие коронального выброса с Землёй. ICME – межпланетный корональный выброса, приближающийся к Земле. Основной частью выброса является замагниченная излучающая петля (FLUX ROPE), окруженная более разреженной оболочкой (SHEATH). Корональный выброс догоняет более медленный солнечный ветер из-за чего на его фронте возникает ударная волна (SHOCK). Линии магнитного поля изламываются на ударной волне. Адаптировано из [3.8].

чувствительность появляется у людей с хроническими заболеваниями, вызывающими нарушение механизмов адаптации организма.

Метеозависимость официально не признана медицинским сообществом как болезнь и не включена в список Международной классификации болезней, принятой Всемирной организацией здравоохранения, однако часть врачей признает возможное влияние погоды на самочувствие человека.

По-видимому, даже очень сильное возмущение геомагнитного поля не несет прямой угрозы жизни человека. Во время самого сильного геомагнитного шторма на Земле, происшедшего в конце XIX века и нескольких менее мощных последующих событий, не было зафиксировано явлений массовой смертности или массовых заболеваний людей.



### Воздействие космической погоды на земные технологии.

В отличие от людей многие технические устройства взаимодействуют с естественной электромагнитной средой Земли, и поэтому регулярно испытывают негативное воздействие космической погоды. Эти воздействия наблюдались в течение длительного времени:

- Магнитный компас изобретен более 2000 лет назад и с тех пор используется для навигации и ориентации. На точность показаний магнитных стрелок компаса влияет космическая погода.
  - Благодаря телеграфу, изобретенному в XIX веке, влияние космической погоды на технологии стало абсолютно очевидным. Телеграфные провода являются длинными линейными проводниками на поверхности Земли, они чувствительны к колебаниям электромагнитного поля Земли. Сильнейшая известная в истории Земли геомагнитная буря, происходившая с 28 августа по 2 сентября 1859 года, известная как «событие Кэррингтона», вызвала повсеместное нарушение работы телеграфных систем в Европе и Северной Америке. Воздействие этой бури было столь велико, что получило название «бешенства телеграфных аппаратов».
  - Радиосвязь, появившаяся в начале XX века, зависит от взаимодействия радиоволн с ионосферой, электропроводящим слоем атмосферы, который испытывает серьёзные возмущения во время явлений космической погоды, вызывающие помехи в распространении радиосигнала. Маркони в 1928 году прокомментировал это явление так: «...время сильного затухания (радиосигналов) практически всегда совпадает с появлением больших солнечных пятен и интенсивного северного сияния, которое обычно сопровождается магнитными бурями...».
- Радиосвязь в районах Арктики и Антарктики подвергается более сильному воздействию помех, из-за более высокой интенсивности возмущений, вызываемых космической

погодой, вблизи магнитных полюсов Земли.

Современная радиосвязь использует ультра-короткие волны (УКВ), для которых не используется эффект отражения от ионосферы. УКВ-диапазоны существенно менее подвержены влиянию космической погоды.

- Первые случаи воздействия космической погоды на электросети наблюдались ещё в 1940-х годах. Самый тяжёлый случай был зафиксирован 13–14 марта 1989 года, когда из-за геомагнитной бури остановилась энергосистема Hydro-Québec в Канаде. Геомагнитная буря, развивавшаяся всего несколько минут, оставила сотни тысяч людей и предприятий без электричества на девять часов.

### **3.3. Сверхмощные вспышки и сверхсильные геомагнитные бури**

#### **3.3.1. Классификация вспышек на Солнце**

С 1975 года вспышки на Солнце классифицируют по мощности испускаемого ими рентгеновского излучения. До этого использовалась их классификация по интенсивности излучения вспышки в линии  $H_{\alpha}$ . Переход на новую систему был связан с появлением на околоземной орбите спутников GOES с постоянно действующими детекторами рентгеновского излучения. У вспышек на Солнце измеряется пиковая (максимальная) интенсивность их излучения в «стандартном» рентгеновском диапазоне 0.5–10 кэВ. Вспышки делят на 5 классов, которые обозначают буквами латинского алфавита, как показано в таблице 3.1.

Для всех классов вспышке кроме А после буквы ставят число – округленное значение мантиссы интенсивности. Для классов В–М эти цифры могут иметь значения от 1.0 до 9.9, а для класса Х могут принимать любые значения большие 1.0. В таблице 3.2 приведено 30 самых мощных вспышек с 1975 года, по данным спутников GOES. По некоторым данным вспышка 04 ноября 2003 г. (самая мощная вспышка в таблице) имела мощность Х40–Х45.

Таблица 3.1 Классификация вспышек на Солнце по их рентгеновскому излучению.

Класс	Интенсивность в пике (Вт/м <sup>2</sup> )
A	меньше $10^{-7}$
B	от $1.0 \times 10^{-7}$ до $10^{-6}$
C	от $1.0 \times 10^{-6}$ до $10^{-5}$
M	от $1.0 \times 10^{-5}$ до $10^{-4}$
X	больше $10^{-4}$

Таблица 3.2 30 самых мощных солнечных вспышек с 1975 г.

Дата	Клас с	Примечания	Дата	Класс	Примечания
06.09.2017	X9.3	Сильнейшая вспышка 24-го цикла солнечной активности	01.06.1991	X12.0	
05.12.2006	X9.0		22.03.1991	X9.4	
07.09.2005	X17.0		25.01.1991	X10.0	
04.11.2003	X28.0	Сильнейшая вспышка с 1975 г. (23-й цикла солнечной активности)	24.05.1990	X9.3	
29.10.2003	X10.0		19.10.1989	X13.0	
28.10.2003	X17.2		29.09.1989	X9.8	
15.04.2001	X14.4		16.08.1989	X20.0	2-я по силе. Сильнейшая вспышка 22-го цикла солнечной активности
02.04.2001	X20.0	2-я по силе.	06.03.1989	X15.0	

06.11.1997	X9.4		20.05.1984	X10.1	
02.11.1992	X9.0		24.04.1984	X13.0	
15.06.1991	X12.0		17.12.1982	X10.1	
11.06.1991	X12.0		15.12.1982	X12.9	
09.06.1991	X10.0		09.07.1982	X9.8	
06.06.1991	X12.0		06.06.1982	X12.0	
04.06.1991	X12.0		11.07.1978	X15.0	Сильнейшая вспышка 21-го цикла солнечной активности

### 3.3.2. Современная статистика вспышек на Солнце.

Зависимость частоты вспышек на Солнце от их энергии имеет степенной вид. Чаще всего происходят самые слабые вспышки. Мощные вспышки примерно класса X10 происходят раз в 1–2 года, а события класса «Кэррингтоновских» – раз в 100–500 лет. На рисунке 3.2 показано распределение частоты вспышек от их интенсивности. Энергия вспышек на рисунке 3.2 охватывает шесть порядков величины от  $10^{24}$  до  $10^{32}$  эрг.

Этот интервал описывается единым показателем степени -1.8 в зависимости вида

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-1.8}, \quad (3.1)$$

где  $N$  – частота вспышек в указанной выше нормировке,  $E$  – их энергия.

Следует заметить, что в работе [3.2] нормировка энергий вспышек несколько отличается от обычной. В частности, в ней наиболее сильные вспышки, зарегистрированные за последние 50 лет, имеют энергии  $10^{32}$  эрг, а «Кэррингтоновское» событие – энергию  $10^{33}$  эрг.

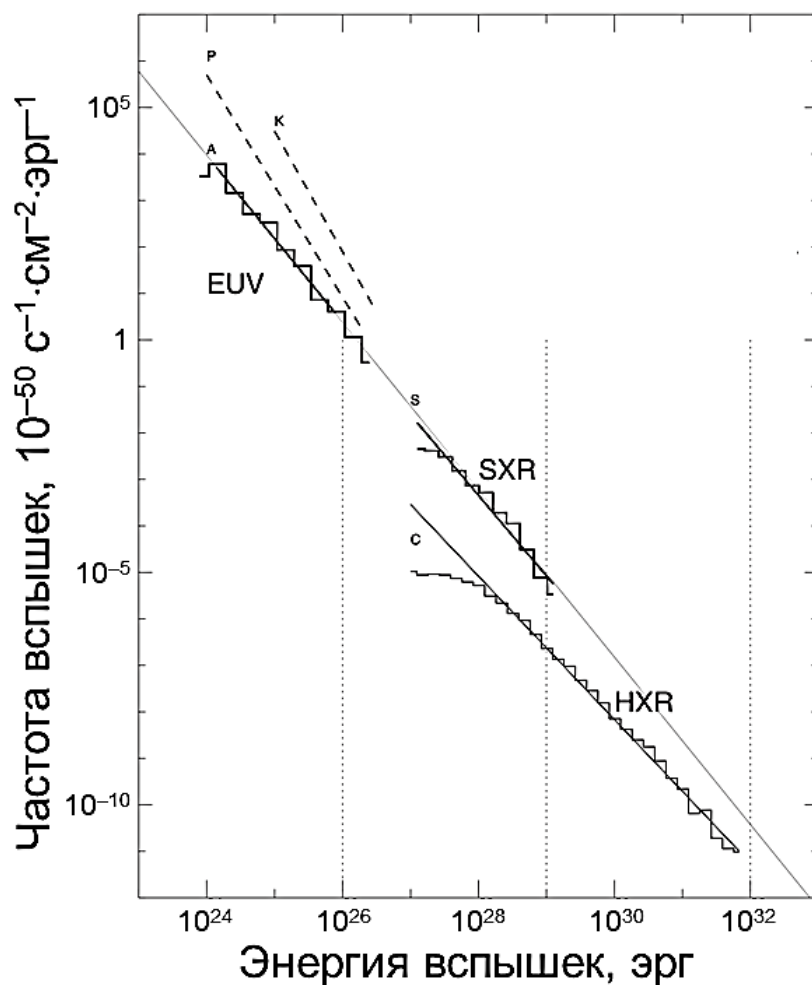


Рис. 3.2. Кумулятивное распределение частоты вспышек в нормированном масштабе в единицах  $10^{-50} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ эрг}^{-1}$  [3.2]. Вспышки регистрировались в экстремальном ультрафиолете (EUV), мягком (SXR) и жестком рентгене (HXR).

В работах других авторов [3.3] зависимости получают несколько иными (см. Рис. 3.3). На этом рисунке выделяются два степенных участка: более пологий для вспышек класса примерно до X3 и более крутой для вспышек больших энергий. Для этого участка показатель степени равен -2.3.

### 3.3.3. Сверхмощные вспышки на Солнце за последние 200 лет

#### 1. «Событие Кэррингтона» 28.08–02.09.1859 г.

С 28 августа по 2 сентября 1859 г. на Солнце наблюдались

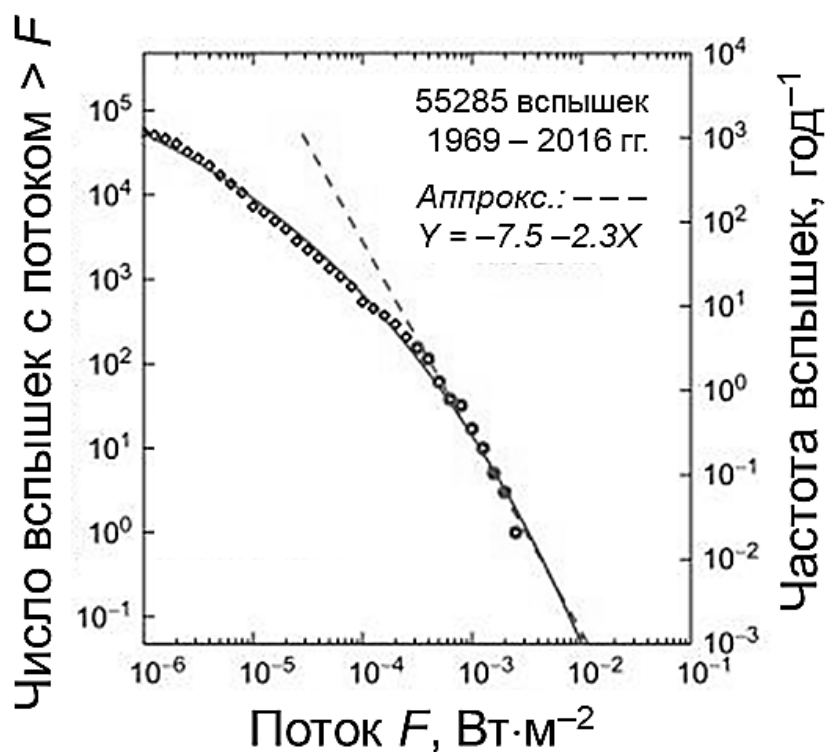


Рис. 3.3. Распределение частоты вспышек из работы [3.3, §3.3].

многочисленные пятна и вспышки. Сразу после полудня 1 сентября 1859 г. британский астроном Ричард Кэррингтон наблюдал наибольшую вспышку, которую он зарисовал (см. Рис. 3.2). Вспышка вызвала крупный корональный выброс массы. Он устремился к Земле и достиг её через 18 ч. 1–2 сентября началась крупнейшая за всю историю регистрации геомагнитная буря. Она вызвала отказ телеграфных систем по всей Европе и Северной Америке. Северные сияния наблюдались по всему миру, даже над Карибами. Над Скалистыми горами на Аляске сияния были настолько яркими, что разбудили золотоискателей, которые начали готовить завтрак, думая, что наступило утро. Энергия вспышки на Солнце по современным оценкам составляла  $10^{32}$  эрг. Индекс геомагнитной активности Dst вызванной этой вспышкой геомагнитной бури, достигал (по современным оценкам) величины  $-900$ – $-1760$  нТл (знак минус означает, что магнитное поле Земли было ослаблено).

Исследования ледяных кернов свидетельствуют, что геомагнитные штормы подобной интенсивности повторяются примерно

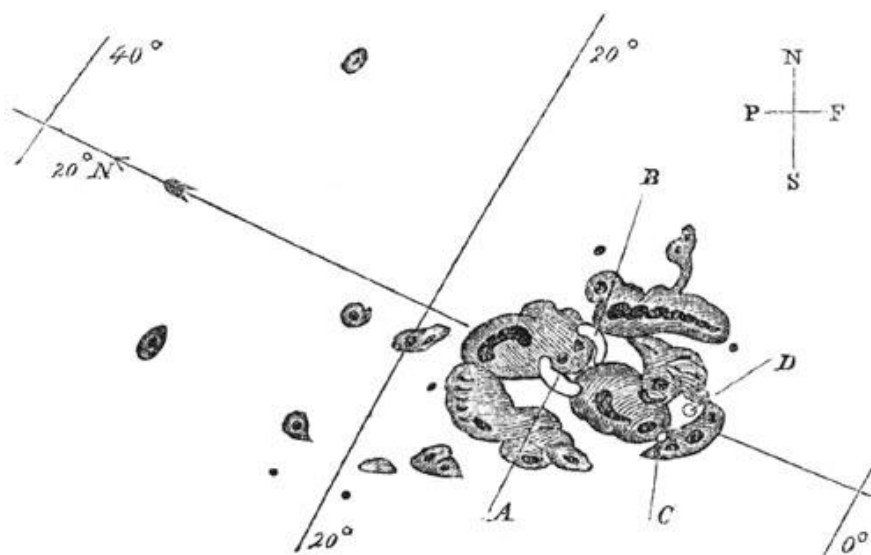


Рис. 3.2 Вид активной области, вызвавшей «Кэррингтоновскую» вспышку 01.09.1959 г. (зарисовка Ричарда Кэррингтона).

раз в 500 лет. Самая сильная буря с начала космической эры (с 1957 г.) произошла 13 марта 1989 г., когда Dst-индекс геомагнитной активности достигал минус 640 нТл.

## 2. Другие исторические геомагнитные штормы:

- аврора 17 ноября 1882г. — полярные сияния на экваторе; нарушения телеграфной связи;
- май 1921 г. — нарушения телеграфной связи;
- 14 ноября 1960 г. — широкомасштабное нарушение радиосвязи;
- 9 марта 1989 г. (вспышка X15) — привела к аварии на электростанции и отключению электричества в Квебеке.

## 3. Вспышка по мощности равная «Кэррингтону».

23 июля 2012 г. на Солнце произошла вспышка по энергии равная событию «Кэррингтона» (т. е.  $E \sim 10^{32}$  эрг). Вспышка произошла на обратной стороне Солнца, она не была видна с Земли и вызванный ею корональный выброс на Землю не попал.

В это время проводился космический эксперимент «STEREO» в котором два космических аппарата облетали Солнце на расстоянии 1 а.е. от него и проводили наблюдения солнечной поверхности. В июле 2012 г. аппараты отстояли примерно на  $120^\circ$

от Земли по ее орбите. Один из этих аппаратов «STEREO-A» и зарегистрировал эту вспышку. На рисунке 3.3 показаны фотографии Солнца со вспышкой, полученные аппаратами «STEREO-B» и «STEREO-A», кратко описанными в разделе 3.4. На рисунке 3.4 показана модель коронального выброса от этой вспышки (сечение плоскостью эклиптики).

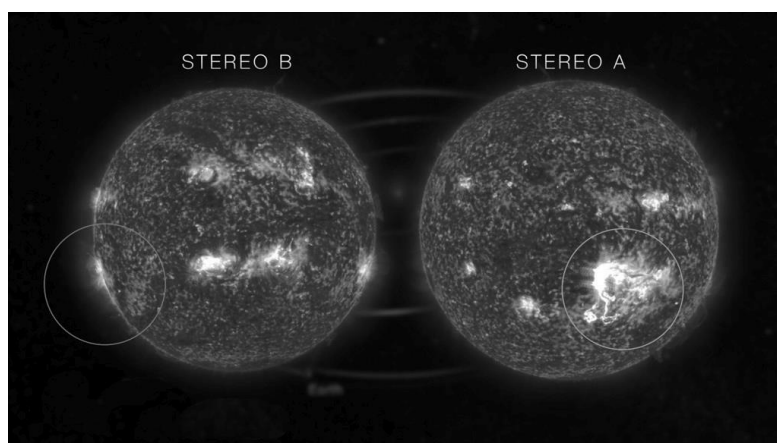


Рис. 3.3 Вспышка 23.07.2012 г. Положение вспышки обведено окружностью.

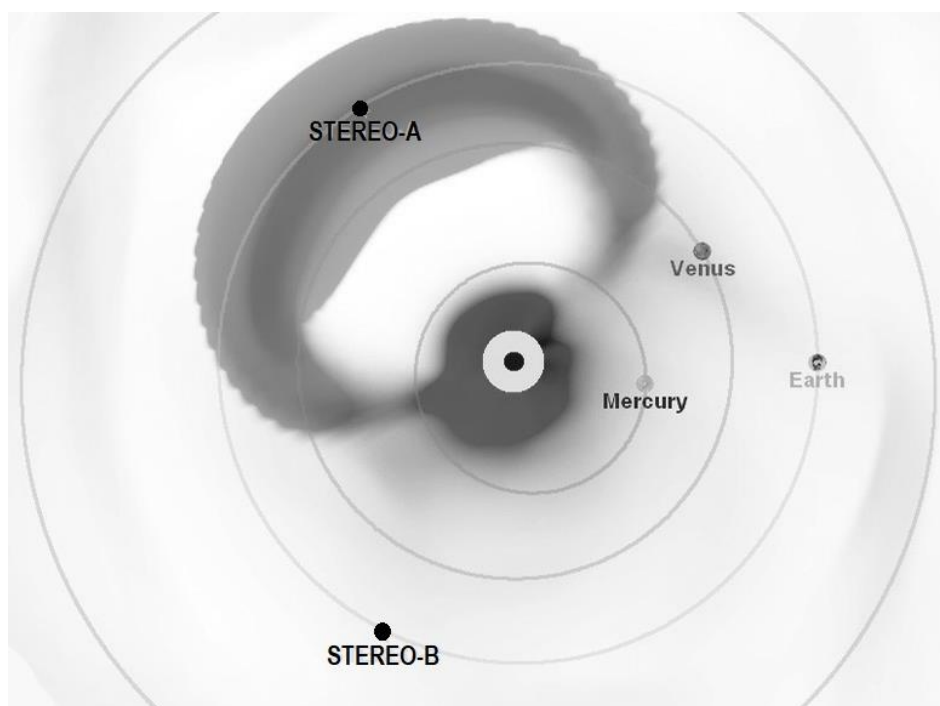


Рис. 3.4 Результат моделирования коронального выброса от вспышки 23.07.2012 г. Показаны положения космических аппаратов «STEREO-A» и «STEREO-B».



### 3.3.4. Вспышки на Солнце в далеком прошлом

Хотелось бы улучшить статистику наиболее мощных вспышек на Солнце, которые происходят реже всего, за счет расширения интервала времени их регистрации в прошлое.

Это можно попытаться сделать путем регистрации космогенных радиоактивных изотопов. Когда энергичные первичные протоны от Солнца попадают в атмосферу, они создают атмосферные ливни, частицы которых порождают изотопы некоторых элементов в результате реакций с ядрами наиболее распространенных элементов.

#### 1. Углерод-14.

Самым важным из них является углерод-14 ( $^{14}\text{C}$ ). Он создаётся в реакции вторичных нейтронов с атомами азота воздуха. Углерод, реагируя с кислородом, превращается в углекислый газ, который поглощается растениями. Период полураспада  $^{14}\text{C}$  составляет 5730 лет. Датирование древесины по содержанию изотопа  $^{14}\text{C}$  является основой радиоуглеродного анализа. Дендрохронология использует кольца роста деревьев для установления точных дат. Применение этих методов может быть использовано для обнаружения пиков содержания  $^{14}\text{C}$ , вызванных наиболее мощными солнечными вспышками. Оно показало 3 интервала за последние 3000 лет, в которых количество изотопа  $^{14}\text{C}$  значительно возросло [3.4]. Самым мощным событием была вспышка, которая произошла в 774–775 гг. нашей эры. Оценка энергии этой вспышки дает  $E \sim 20$  «Кэррингтонов»  $\sim (2 \cdot 10^{33} \text{ эрг})$ , но тут возможна большая систематическая ошибка. Второе, но менее мощное событие, произошло в 993–994 гг. н. э. Третья обнаруженная вспышка произошла в 660 г. до н. э. Имеется ещё несколько более слабых кандидатов, но достоверность их обнаружения вызывает вопросы.

#### 2. Бериллий-10 и Хлор-36.

$^{14}\text{C}$  не единственный изотоп, который может быть создан энергичными частицами. Бериллий-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) образуется из азота и кислорода воздуха и осаждается в полярном льду. По этому изотопу сложнее определять даты. Хлор-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) может быть получен из аргона, третьего по распространенности компонента воз-

духа, и отложен в полярном льду. Образующееся количество  $^{36}\text{Cl}$  низкое, соответственно, ухудшается точность временной датировки. Повышенное содержание и  $^{10}\text{Be}$ , и  $^{36}\text{Cl}$  было обнаружено в кернах льда в Антарктиде и в Гренландии, соответствующих 774–775 гг. и 993–994 гг. н. э.

3. В работе [3.5] по изотопам  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  были определены флюенсы протонов (число протонов за время вспышки попадающих на  $1\text{ м}^2$  поверхности Земли за пределами атмосферы) с энергией  $E > 30\text{ МэВ}$  за последние 10 тыс. лет, которые показаны в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Флюенсы протонов с энергией больше 30 МэВ солнечных вспышек за последние 10 000 лет/

Год	Флюенс, $\text{м}^{-2}$
1810 г. н. э.	$1.0 \cdot 10^{10}$
1719 г. н. э.	$1.0 \cdot 10^{10}$
1505 г. н. э.	$1.3 \cdot 10^{10}$
1460–1462 г. н. э.	$1.5 \cdot 10^{10}$
780 г. н. э.	$2.4 \cdot 10^{10}$
265 г. н. э.	$2.0 \cdot 10^{10}$
265 г. н. э.	$2.0 \cdot 10^{10}$
95 г. н. э.	$2.6 \cdot 10^{10}$
1485 г. до н. э.	$2.0 \cdot 10^{10}$
2225 г. до н. э.	$1.2 \cdot 10^{10}$
2615 г. до н. э.	$1.2 \cdot 10^{10}$
3260 г. до н. э.	$2.4 \cdot 10^{10}$
4680 г. до н. э.	$1.6 \cdot 10^{10}$
5165 г. до н. э.	$2.4 \cdot 10^{10}$
5835 г. до н. э.	$1.5 \cdot 10^{10}$
6585 г. до н. э.	$1.7 \cdot 10^{10}$
6940 г. до н. э.	$1.1 \cdot 10^{10}$
7455 г. до н. э.	$1.5 \cdot 10^{10}$
7570 г. до н. э.	$2.0 \cdot 10^{10}$
7930 г. до н. э.	$1.3 \cdot 10^{10}$
8085 г. до н. э.	$1.5 \cdot 10^{10}$
8155 г. до н. э.	$1.3 \cdot 10^{10}$
8910 г. до н. э.	$2.0 \cdot 10^{10}$

Данные в этой таблице имеют следующие особенности. Во-первых, флюенс ниже  $1.0 \cdot 10^{10}$  не регистрируется. Во-вторых, флюенс  $1.5 \cdot 10^{10}$  примерно соответствует «Кэррингтоновскому» событию. Наконец, максимальная мощность вспышек не превышает 2 «Кэррингтонов». Отсутствие в таблице 3.3 вспышек заметно превышающих «Кэррингтоновские» за последние 10 000 лет является аргументом в пользу существования верхнего предела энергии вспышки.

### 3.3.5. Предельная энергия солнечной вспышки: теория

Звёзды похожие на Солнце и более красные (т. е. менее массивные) обладают мощной конвективной оболочкой, в которой магнитные поля скручиваются в жгуты, всплывающие на поверхность звезды. Трубки магнитного поля там видны как солнечные (звёздные) пятна, а перезамыкания полей вызывают солнечные (звёздные) вспышки.

Частота и мощность вспышек зависит от напряженности магнитного поля и от скорости осевого вращения звезды. На рисунке 3.5 показана зависимость рентгеновской светимости звёзд от напряженности магнитного поля. В левой части показаны различные «части» Солнца: его конвективная оболочка, яркие рент-

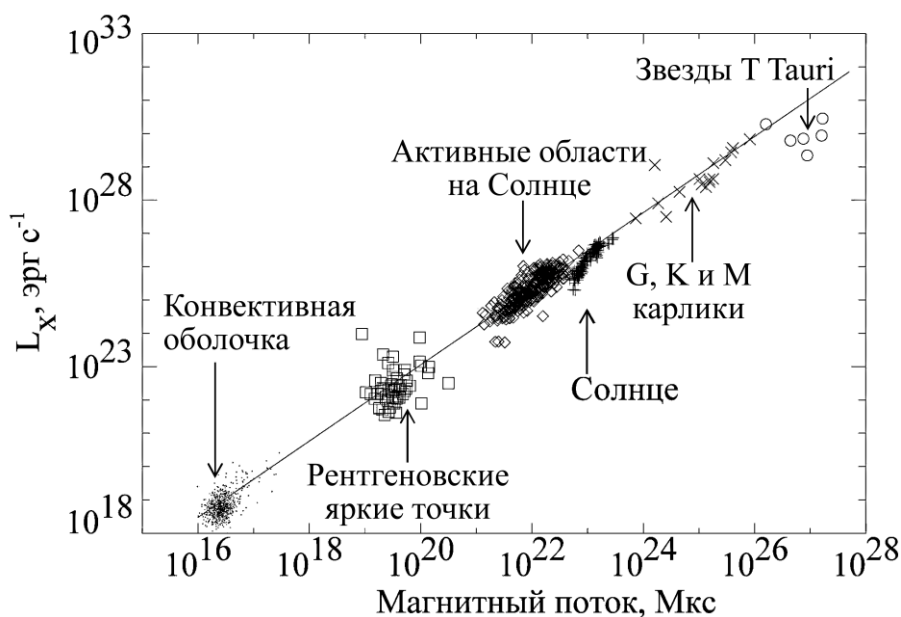


Рис. 3.5 Зависимость рентгеновской светимости различных областей на Солнце и различных звёзд от их магнитного поля/

геновские точки и активные области, расположенные по возрастанию магнитных полей в них. А далее идут звёзды целиком: Солнце, звёзды-карлики спектральных классов G, K и M, звёзды типа T Tauri, также расположенные по возрастанию их магнитных полей. Рис. 3.5 показывает практически линейную зависимость между рентгеновской светимостью  $L_x$  (т. е. энергией вспышек) и магнитным полем  $B$  (прямая линия в дважды логарифмических координатах, как на рисунке 3.5, соответствует произвольной степенной зависимости, но у прямой на рисунке показатель степени близок к 1, т. е. зависимость почти линейная).

Теоретиками рассматриваются два основных варианта оценки максимальной мощности вспышки на звезде (в том числе на Солнце):

1. Максимальной мощности вспышки не существует. Сколько бы большую энергию вспышки мы не выбрали, время от времени в звезде будет возникать такая структура магнитных полей, перезамыкание которых даст вспышку с необходимо энергетикой. При большой энергии вспышки ждать придется очень долго.

2. Существует ограничение сверху на мощность вспышки. Она примерно равна энергии магнитного поля в конвективной оболочке звезды. Больше энергии в магнитных полях нет, соответственно, более мощной вспышки на звезде возникнуть не может. Энергия «Кэррингтоновской» вспышки примерно равна энергии магнитного поля в конвективной оболочке Солнца.

### **3.4. Супервспышки и их возможные последствия**

#### **3.4.1. Что такое супервспышки?**

Даже вспышка «Кэррингтоновского» уровня и вызванный ею мощнейший геомагнитный шторм не представляют непосредственной угрозы для жизни людей. Она представляет угрозу технической инфраструктуре человечества, перспективы противодействия которой достаточно понятны. Но так ли это будет, если произойдет на порядок более мощная вспышка? А если на четыре порядка?

Это очень важный вопрос: Какая самая мощная вспышка может произойти на Солнце? Есть ли верхний предел их мощности? Такие явления называют «супервспышками». На Солнце они не наблюдались. Возможно, из-за недостатка времени наблюдений, и она нас ждет впереди, а, возможно, супервспышки на Солнце невозможны в принципе.

### 3.4.2. Супервспышки на звёздах

Супервспышки наблюдаются на других звёздах. Массовые наблюдения этих явлений были проведены в обзорах Kepler и TESS, о которых речь пойдет ниже. Но первые супервспышки были обнаружены раньше, девять из них из работы [3.1] приведены в таблице 3.4. Самая слабая из этих вспышек имеет энергию  $2 \cdot 10^{33}$  эрг, т. е.  $20 \times$  «Кэррингтон», а самые сильные – вблизи  $10^{38}$  эрг. Обращаем внимание, что энергию вспышек на Солнце мы измеряем в рентгеновском диапазоне, а для супервспышек энергия получена разными способами, в основном, в других диапазонах, которые еще надо правильно сравнивать друг с другом и с Солнцем.

Обсудим теперь (супер)вспышки на других звёздах солнечного типа. Для того, чтобы увидеть на Солнце очень мощную вспышку придется очень долго ждать – десятилетиями, а, может быть, веками. Однако в нашей Галактике находится около 400 млрд звёзд, и, если какое-то явление происходит на отдельной звезде 1 раз в 100 лет, то в ансамбле всех звёзд в Галактике оно будет происходить больше сотни раз в секунду.

Вспышки на звёздах, их зависимость от параметров звёзд интересны сами по себе. Однако если мы хотим полученные по звёздам результаты применить к Солнцу то надо отобрать звёзды близкого к Солнцу спектрального класса, которых меньше, или звёзды очень похожие на Солнце, или почти точные двойники Солнца, а таких звёзд будет еще меньше. Вопрос о сходстве звезды и Солнца мы еще обсудим ниже.

Массовые наблюдения звёзд сегодня возможны в видимом и примыкающих к нему ультрафиолетовом и близком инфракрас-

Таблица 3.4 Десять супервспышек на различных звёздах из работы [3.1]

Звезда	Спектр. класс	V (mag)	Метод определения	Амплитуда вспышки	Длительность	Энергия, эрг
Грумбридж 1830	G8V	6.45	фотограф.	$\Delta B = 0.62^m$	18 мин	$E_B \sim 10^{35}$
Каппа <sup>1</sup> Кита <sup>*)</sup>	G5V	4.83	спектроскоп.	$EW(He) = 0.13 \text{ \AA}$	~ 40 мин	$E \sim 2 \cdot 10^{34}$
MT Тельца	G5V	16.8	фотограф.	$\Delta U = 0.7^m$	~ 10 мин	$E_U \sim 10^{35}$
Пи <sup>1</sup> Большой Медведицы <sup>*)</sup>	G1.5Vb	5.64	рентген.	$L_X = 10^{29} \text{ эрг/с}$	> 35 мин	$E_X = 2 \cdot 10^{33}$
S Печи	G1V	8.64	визуал.	$\Delta V \sim 3^m$	17 – 367 мин	$E_V \sim 2 \cdot 10^{38}$
BD +10°2783	G0V	10.0	рентген.	$L_X = 2 \cdot 10^{31} \text{ эрг/с}$	~ 49 мин	$E_X \gg 3 \cdot 10^{34}$
Омикрон Орла	F8V	5.11	фотометр.	$\Delta V = 0.09^m$	~ 5 – 15 дн.	$E_{BV} \sim 9 \cdot 10^{37}$
5 Змеи	F8IV-V	5.06	фотометр.	$\Delta V = 0.09^m$	~ 3 – 25 дн.	$E_{BV} \sim 7 \cdot 10^{37}$
UU Северной Короны	F8V	8.86	фотометр.	$\Delta I = 0.30^m$	> 57 мин	$E_{opt} \sim 7 \cdot 10^{35}$
Примечание: *) Цифра (верхний индекс) после буквы в классическом обозначении звезды Байера (буква греческого алфавита и название созвездия) означает, что эта звезда оказалась визуальной двойной или кратной звездой. Цифра указывает на номер компонента.						

ном диапазонах Но в них мы можем наблюдать только самые сильные вспышки. Так прямое наблюдение в этих диапазонах очень мощной солнечной вспышки 28 октября 2003 г., имевшей класс X17, показало, что светимость Солнца во время нее увеличилась на 0.027%, т. е. на  $0.003^m$ . Экстраполируя этот результат на вспышку класса X1000 получаем возрастание светимости Солнца на 1–3%, что соответствует изменению блеска звезды на  $0.01^m$  –

$0.03^m$ . Регистрация таких малых изменений блеска звезды требует проведения фотометрии очень высокой точности.

К счастью, в современной астрономии есть направление исследований, которое требует одновременного измерения блеска большого числа звёзд с высокой фотометрической точностью – это поиск планет у других звёзд («экзопланет») методом транзитов. Транзит – прохождение планеты по диску звезды, которое вызывает ее частичное затмение и уменьшение блеска. Поскольку размер планеты намного меньше размера звезды уменьшение блеска составляет обычно  $0.01\text{--}0.5\%$ . Для их обнаружения необходима фотометрическая точность на уровне  $0.005^m\text{--}0.0001^m$  (см. Рис. 3.6).

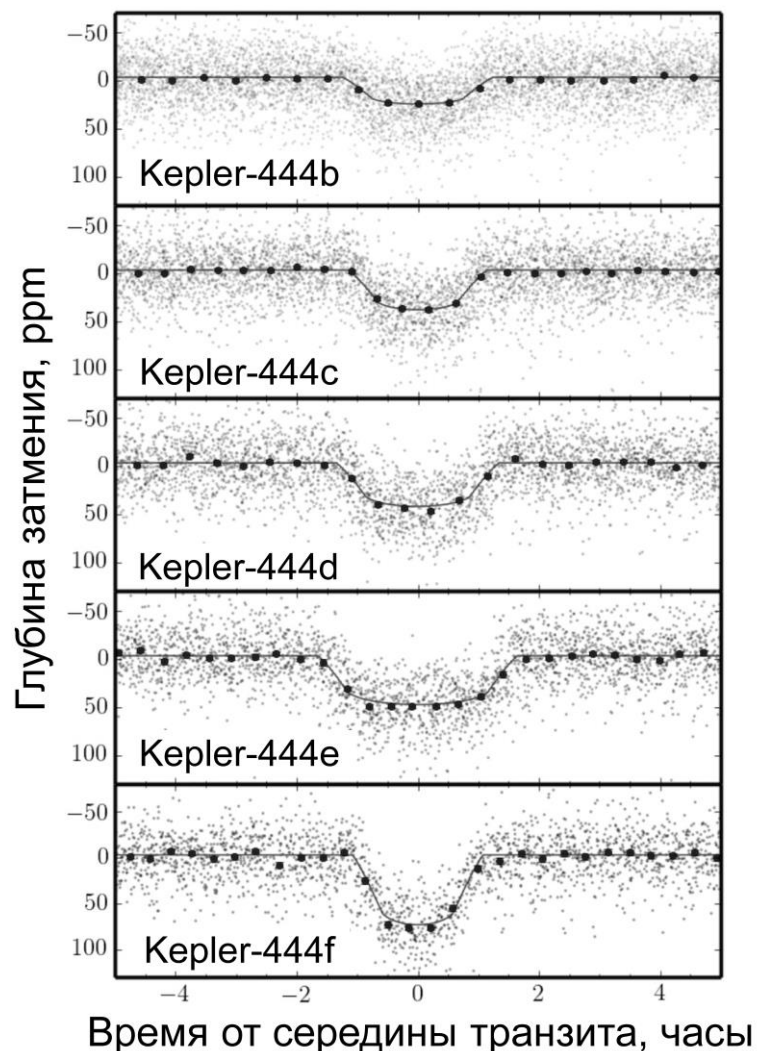


Рис. 3.6 Кривые блеска пяти экзопланет системы Kepler-444. Глубина транзита показана в единицах  $10^{-6}$  звёздной величины, время – в часах от середины транзита (затмения) [3.6].

В последние годы исследование экзопланет вызывает гораздо больший интерес, чем даже исследование космической погоды, ведь некоторые экзопланеты – это места, где, возможно, в будущем расселится человечество.

С целью поиска экзопланет были проведены два очень удачных космических обзора «Кеплер» и TESS. Космический аппарат «Кеплер» был запущен в 2009 г. и проработал до 2018 г. На его борту был установлен широкоугольный телескоп системы Шмидта с диаметром главного зеркала 1.4 м и корректирующей пластины 0.95 м. Поле зрения телескопа составляло 105 квадратных градусов (примерно 0.25% площади небесной сферы). Телескоп был направлен на одну и ту же область неба, по касательной к рукаву Галактики, в которой находится Солнце. Экспозиции этого участка неба производились непрерывно, каждая длилась 30 мин. В этом режиме телескоп работал с 2009 г. по май 2013 г., когда вышла из строя система ориентации аппарата. Далее миссию продолжили в сканирующем режиме. В поле зрения регистрировалось примерно 500 000 звёзд, но из них записывались данные только о 160 000 звёзд ярче  $16^m$ . Эти звёзды расположены на расстоянии до 1 кпк от Солнечной системы. В результате этого эксперимента было открыто 2600 экзопланет и 2000 кандидатов (экзопланет, у которых «Кеплер» наблюдал только 2 транзита).

Вторым обзором был космический эксперимент TESS, целью которого был обзор экзопланет на 85% неба, разбитого на 26 секторов, на расстояниях ближе 70 пк (200 св. лет). Аппарат был запущен в 2018 г. и в начале 2024 г. всё ещё продолжал наблюдения. На космическом аппарате стоят 4 одинаковых телескопа рефрактора диаметром 10.5 см с размером кадра  $24^\circ \times 24^\circ$ . Кадры выстроены в «линию» и образуют общее поле зрения размером  $24^\circ \times 96^\circ$ . Эта полоса устанавливается так, чтобы в центре крайнего кадра находился южный полюс эклиптики, наблюдение длится 27 дней. Затем поле зрения поворачивается вокруг полюса на  $1/13$  оборота и наблюдения повторяются. После наблюдения 13 сегментов в южном полушарии эклиптики проводятся наблюдения 13 сегментов вокруг ее северного полюса. Основная программа зани-



мала 2 года и включала двукратное наблюдение северного и южного полушарий эклиптики. К осени 2023 г. TESS открыл более 2000 экзопланет и 4000 кандидатов в экзопланеты.

Помимо экзопланет оба обзора дали очень много информации о переменности звёзд, в том числе и о вспышках на них. В эксперименте «Kepler» были обнаружены несколько тысяч вспышек, в то время, как за несколько лет наблюдений до него – только 10 вспышек, приведенных в таблице 3.5.

В работе [3.7] произведен поиск вспышек в данных наблюдений «Kepler» за 4 года работы по основной программе. Анализ проводился для двух выборок. Первая – «звёзды солнечного типа» с эффективной температурой  $T_{eff} = 5100 \div 6000\text{K}$  и ускорением силы тяжести в фотосфере  $\log g \geq 4.0$  – звёзды-карлики спектрального класса G главной последовательности. Вторая – «звёзды похожие на Солнце» с  $T_{eff} = 5600 \div 6000\text{K}$ ,  $\log g \geq 4.0$  и периодом вращения  $P > 20$  дней – звёзды раннего спектрального класса G с медленным вращением. Солнце – желтый карлик спектрального класса G2V с  $T_{eff} = 5780\text{K}$ ,  $\log g = 4.44$  и  $P = 25.3$  дня (на экваторе).

Из 160 000 звёзд, регистрировавшихся в основном поле наблюдений обзора «Kepler», 83 000 звёзд – «звёзды солнечного типа», и примерно 4 500 звёзд относятся к «похожим на Солнце».

На этих звёздах были обнаружены вспышки со следующими характеристиками:

- 2341 супервспышка на 265 «звёздах солнечного типа»;
- 26 супервспышек на 15 «звёздах похожих на Солнце»;
- длительность супервспышек примерно 1/10 дня;
- для «звёзд солнечного типа» максимальная энергия вспышек достигает  $10^{36}$  эрг, а у звёзд «похожих на Солнце» –  $4 \cdot 10^{34}$  эрг;
- самые сильные вспышки происходят у быстро вращающихся звёзд (с  $P = 1\text{--}3$  дня), одновременно это самые молодые звёзды;
- частота супервспышек у молодых звёзд с  $P = 1\text{--}3$  дня примерно в 100 раз выше, чем у старых, медленно вращающихся звёзд с  $P > 20$  дней;

- для «звёзд похожих на Солнце» вспышки с энергией  $\sim 7 \cdot 10^{33}$  эрг (класса X700) происходят примерно 1 раз в 3000 лет, а вспышки с  $\sim 1 \cdot 10^{34}$  эрг (класса X1000) – 1 раз в 6000 лет.

Таким образом, данные обзора «Kepler» говорят в пользу наличия верхнего предела мощности у вспышек на Солнце, но он существенно выше, чем у «Кэррингтоновского» события.

Похожие результаты дал и анализ наблюдений TESS.

Вопрос, на который не могут ответить эти статистические исследования, – насколько типичным представителем звёзд «похожих на Солнце» – является само Солнце.

### 3.4.3. Последствия супервспышки на Солнце

Супервспышка на Солнце с энергией  $E \approx 10^{38}$  эрг, например, как та, которая наблюдалась у звезды S Печи, привела бы к следующим последствиям в Солнечной системе:

- появление следов на породах поверхности Луны;
- массовое таяние льдов на Земле с последующим их замерзанием;
- таяние льдов на спутниках Юпитера также с последующим замерзанием.

Многочисленные наблюдательные данные свидетельствуют, что этих явлений в Солнечной системе не было.

Даже гораздо меньшие по мощности супервспышки вызвали бы на Земле следующие технические последствия:

- повреждение или потеря большого числа искусственных спутников;
- большие дозы радиации у космонавтов и пассажиров авиарейсов, особенно трансполярных;
- уменьшение озонового слоя с последующим повышением риска катаракты, солнечных ожогов и рака кожи, а также повреждений растений (подробнее этот механизм обсуждается в разделе «Астрофизические опасности»);
- отказы систем распределения электроэнергии, повреждение трансформаторов и коммутационного оборудования;

- перерыв радиосвязи из-за повышенной ионизации в атмосфере.

### **3.5. Некоторые космические эксперименты по наблюдению активности Солнца**

#### GOES

Geostationary Operational Environmental Satellite – «геостационарный эксплуатационный спутник наблюдения за окружающей средой» – серия спутников находящихся в ведении американской информационной службы по космическим данным об окружающей среде (NESDIS), обеспечивающих прогнозирование погоды, отслеживание штормов и метеорологические исследования. Спутники и наземная инфраструктура системы предоставляют таким потребителям, как национальная служба погоды (NWS), непрерывный поток данных об окружающей среде. С 1975 г. по настоящее время запущено 18 спутников этой серии четырех поколений. На борту этих спутников установлены рентгеновские детекторы, регистрирующие вспышки на Солнце и определяющие их мощность.

#### SOHO

Solar and Heliospheric Observatory – космический аппарат для наблюдения за Солнцем. Совместный проект ESA и NASA. Был запущен 2 декабря 1995 года, выведен в окрестность точки Лагранжа L1 системы Земля—Солнце и приступил к работе в мае 1996 года. SOHO имеет на борту 12 инструментов, позволяющих получать изображения или измерять потоки излучения Солнца: 5 раз в час (каждые 12 мин) все инструменты строят изображения обращенного к Земле полушария Солнца и отсылают их на Землю. Инструменты SOHO могут регистрировать вспышки на Солнце, а также выбросы вещества и протуберанцы на краю диска Солнца.

#### ACE

Advanced Composition Explorer – космический аппарат запущенный NASA в рамках программы исследования Солнца и космического пространства для изучения энергичных частиц солнечного ветра, межпланетной и межзвёздной среды. Информация с ACE,

передаваемая в реальном времени, используется Центром космического предсказания погоды (Space Weather Prediction Center) для повышения достоверности прогнозов и предупреждения о геомагнитных бурях.

Спутник ACE был запущен 25 августа 1997 г. и в настоящее время находится на орбите Лиссажу вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце–Земля. Состояние космического аппарата в целом оценивается как хорошее, у него ещё достаточно топлива для поддержания орбиты до конца 2024 года. На борту ACE установлены 9 инструментов, предназначенных для регистрации различных видов ускоренных частиц (от Солнца и галактических космических лучей).

### STEREO.

Solar TERrestrial RElations Observatory – миссия NASA по изучению солнечной активности. Два одинаковых космических аппарата, запущенных 26 октября 2006 года на гелиоцентрические орбиты, близкие к орбите Земли — один из них постепенно обгоняет Землю (Ahead, STEREO-A), а другой, наоборот, отстает от нее (Behind, STEREO-B). Каждый из аппаратов наблюдает обращенную к нему полусферу Солнца. Когда аппараты находятся близко друг к другу (это происходит, когда они находятся недалеко от Земли или, наоборот, на противоположной от Земли стороне орбиты), большая часть поверхности Солнца одновременно регистрируется обоими аппаратами. Поскольку наблюдения Солнца ведутся из двух разных точек, то достигается стереоскопический эффект, позволяющий получать трёхмерные изображения структур и явлений на Солнце. Когда аппараты оказываются по разные стороны Солнца, их поля зрения перестают перекрываться, но появляется возможность одновременно наблюдать всю поверхность Солнца.

Одной из целей проекта было изучение корональных выбросов массы, и стереоскопический эффект позволял определить положение источника выброса на Солнце и траекторию его движения, которые невозможно определить по одиночному наблюдению с помощью коронографа у Земли, как, например, в проекте SOHO.

### 3.6. Организации, занимающиеся космической погодой

Космической погодой сегодня занимается Всемирная метеорологическая организация (ВМО, WMO). Прогнозы и результаты мониторинга космической погоды, широко используется авиакомпаниями, спутниковой индустрией, электросетевыми организациями, а также пользователями спутниковых навигационных систем. Агентства по чрезвычайным ситуациям разрабатывают процедуры управления рисками опасных явлений, связанных с космической погодой, в рамках общего подхода к управлению рисками. Несколько глобальных центров космической погоды круглосуточно предоставляют сведения о космической погоде Международной организации гражданской авиации (ИКАО).

Начало регулярному прогнозированию условий космической погоды было положено Международным радиотехническим союзом. Он признал, что изменения в космической среде будут влиять на радиосигналы, и предложил передавать ежедневные радиокосмические бюллетени. Первая передача информации об условиях распространения радиосигнала состоялась в 1928 году с Эйфелевой башни.

В настоящее время обслуживание, связанное с космической погодой, предоставляют 20 центров космической погоды, расположенных в разных странах. С 1962 года Международная служба космической среды (ISES) служит как основная «зонтичная» организация по вопросам обслуживания, связанного с космической погодой, выступая в качестве форума для обмена данными, обмена и сравнения прогнозов, обсуждения потребностей пользователей и определения самых высоких приоритетов для улучшения обслуживания.

ВМО признаёт, что спрос на обслуживание, связанное с космической погодой, растёт, поскольку общество становится всё более зависимым от технологий, подверженных негативному воздействию явлений космической погоды. В ряде стран разрабатываются процедуры управления рисками опасных явлений, связанных с космической погодой, в рамках подхода к уменьшению опасности бедствий, учитывающего многие опасные явления. Ожидается,

что спрос на информацию о космической погоде будет расширяться по мере повышения осведомлённости о воздействии явлений космической погоды, роста незащищённости общества и эволюции продукции и обслуживания, связанных с космической погодой.

Учитывая планетарный масштаб явлений космической погоды, необходима глобальная координация, которая будет играть ключевую роль в повышении устойчивости стран к воздействию космической погоды. ВМО — одна из немногих организаций, которая способствует оперативному глобальному сотрудничеству. По существу, Организация имеет возможность организовать предоставление соответствующей информации о космической погоде всем членам ВМО в рамках наращивания потенциала.

В настоящее время ведётся работа по интеграции космической погоды в основную деятельность ВМО с целью создания Глобальной службы космической погоды. Для этого космические и наземные системы наблюдения за космической погодой должны быть скоординированы с использованием единообразной, качественной продукции в области космической погоды.

В России космической погодой занимаются в Институте Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) и в Институте прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова РАН (ИПГ). На сайтах обеих этих организаций существуют разделы, посвященный космической погоде и активности Солнца: ее текущему состоянию, прогнозу на ближайшее будущее (~1 неделя) и статистике (ИЗМИРАН: <http://spaceweather.izmiran.ru/>; ИПГ: <http://spaceweather.ru/>). На сайте ИЗМИРАН предоставляется доступ к архиву данных с 1957 г. Курирует исследования космической погоды Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (<http://ipk.meteorf.ru/>).

### **3.7. Над чем работать**

#### Противодействие.

Прямое противодействие космической погоде сегодня невозможно. Мы пока в принципе не знаем, как предотвратить вспышку

на Солнце (или изменить момент ее начала) или возникновение геомагнитного шторма при встрече Земли с корональным выбросом.

Вместо этого мы вполне успешно можем противостоять воздействию космической погоды на биосферу Земли, в том числе на людей, и на технологическую сферу.

#### Противодействие воздействию на человека и биосферу.

Практически не требуется даже при вспышках сильнее «Кэррингтоновской». Возможно следует более внимательно изучить воздействие на биосферу Земли предельно возможной по данным «Kepler» вспышки –  $4 \cdot 10^{34}$  эрг (класса X4000).

#### Противодействие воздействию на технологическую сферу.

##### 1. Предсказание вспышек.

Для предсказания вспышек нужны космические аппараты для непрерывного наблюдения за Солнцем в двух точках:

- в точке Лагранжа L1 системы Солнце – Земля, там сейчас находится КА SOHO;
- на орбите Земли, отставая от нее на  $90^\circ$ – $120^\circ$ , для того чтобы видеть пятна, появляющиеся с обратной стороны Солнца;
- спутники типа GOES на околоземной орбите для регистрации рентгеновского излучения от вспышек.

##### 2. Противодействие воздействию на технику.

Тут возможны три основных подхода:

- изготовление аппаратуры, устойчивой к воздействию космической погоды (но такая аппаратура будет дороже);
- перевод аппаратуры на время вспышки в специальный режим (например, выключение);
- использование более дешевой и простой аппаратуры без защиты и ее запас на случай быстрой замены при выходе из строя.

#### *Литература к разделу*

- 3.1. Schaefer B.E., King J.R., Deliyannis C.P., Superflares on ordinary solar-type stars // *Astrophys. J.*, V. 529, No. 2, P. 1026-1030, 2000.

- 3.2. Aschwanden M.J., Tarbell T.D., Nightingale R.W., Schrijver C.J., Title A., Kankelborg C.C., Martens P., Warren H.P., Time Variability of the “Quiet” Sun Observed with TRACE. II. Physical Parameters, Temperature Evolution, and Energetics of Extreme-Ultraviolet Nanoflares // *Astrophys. J.*, V. 535, P. 1047-1065, 2000.
- 3.3. Extreme Events in Geospace. Origins, Predictability, and Consequences / Ed. N.Buzulukova – Elsevier Science, 2018.
- 3.4. Miyake F., Nagaya K., Masuda K., Nakamura T., A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan // *Nature*, V. 486, No. 7402. P. 240-242, 2012.
- 3.5. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Occurrence of Extreme Solar Particle Events: Assessment From Historical Proxy Data // *Astrophys. J.*, V. 757:92, 2012.
- 3.6. Campante T.L., Barclay T., Swift J.J., Huber D., Adibekyan V.Zh., et al., An ancient extrasolar system with five sub-Earth-size planets // *Astrophys. J.*, V. 799:170, 2015. (arXiv: 1501.06227).
- 3.7. Okamoto S., Notsu Y., Maehara H., Namekata K., Honda S., Ikuta K., Nogami D., Shibata K., Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data // *Astrophys. J.*, V. 906:72, 2021.
- 3.8. Kilpua E., Koskinen H., E., J., Pulkkinen T. I. Coronal mass ejections and their sheath regions / *Living Rev. Sol. Phys.* P. 1-83, 2017.



## 4. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ

Астрофизическими называют те космические опасности, причины которых находятся за пределами Солнечной системы, в «далеком» космосе. Причины астрофизических опасностей могут быть разными. Это может быть пролёт через Солнечную систему массивного космического объекта или какой-то другой вид встряски нашей планетной системы, например, близкий к нам взрыв космического масштаба, попадание Солнца в необычную область пространства и т. д..

Приведённый список причин очевидно неполон. Ниже мы рассмотрим и обсудим ряд астрофизических опасностей.

### 4.1. Пролёт звезды через Солнечную систему

#### Ближайшие звёзды.

Рядом с Солнцем и Солнечной системой в нашей Галактике находятся другие звёзды. Средняя концентрация звёзд вблизи Солнца составляет  $0.12 \text{ пк}^{-3}$ , что соответствует объёму пространства  $8 \text{ пк}^3$  на одну звезду, а среднее расстояние между ближайшими звёздами составляет 2 пк (6.5 световых лет).

Ближайшей к нам звездой является Проксима Центавра или  $\alpha$  Центавра С – один из компонентов тройной звезды  $\alpha$  Центавра. Расстояние до неё равно 1.3 пк (4.2 св. года). На рисунке 4.1 показаны ближайшие к Солнцу звёзды, удаленные от нас не более, чем на 12 св. лет. В сфере с таким радиусом находятся 56 звёзд, некоторые из них – кратные системы. Всего эти системы содержат 63 звёзды и 13 коричневых карликов. Все эти звёзды участвуют во вращении вокруг центра Галактики со средней скоростью 220 км/с, а также в движении друг относительно друга разных направлениях со скоростями в десятки км/с. Взаимное движение

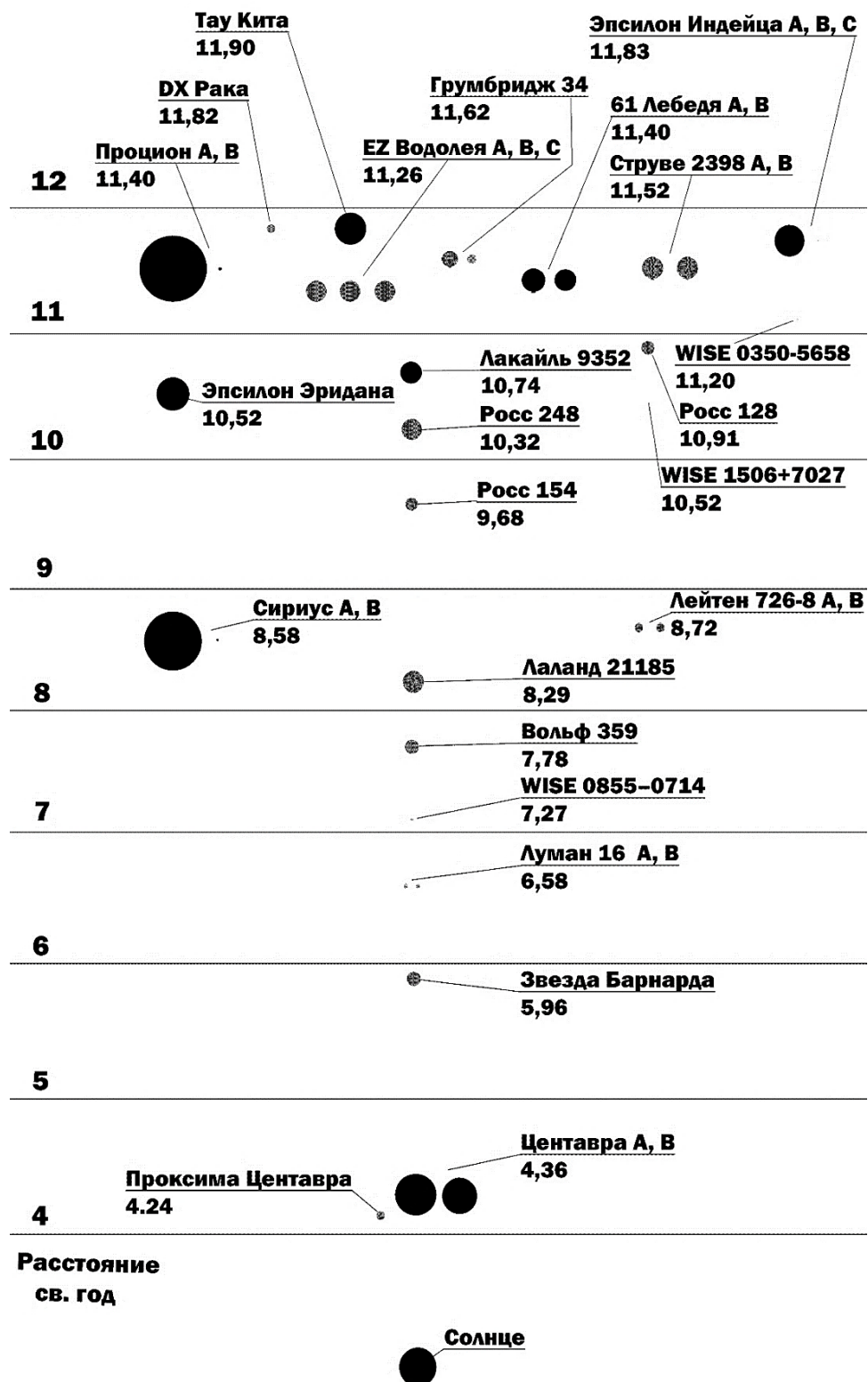


Рис. 4.1. Ближайшие к Солнечной системе звёзды до расстояния 12 световых лет.

звёзд приводит к тому, что время от времени звёзды приближаются к Солнечной системе.

Сближения со звёздами из солнечных окрестностей в течение 80 тыс. лет показаны на рисунке 4.2.

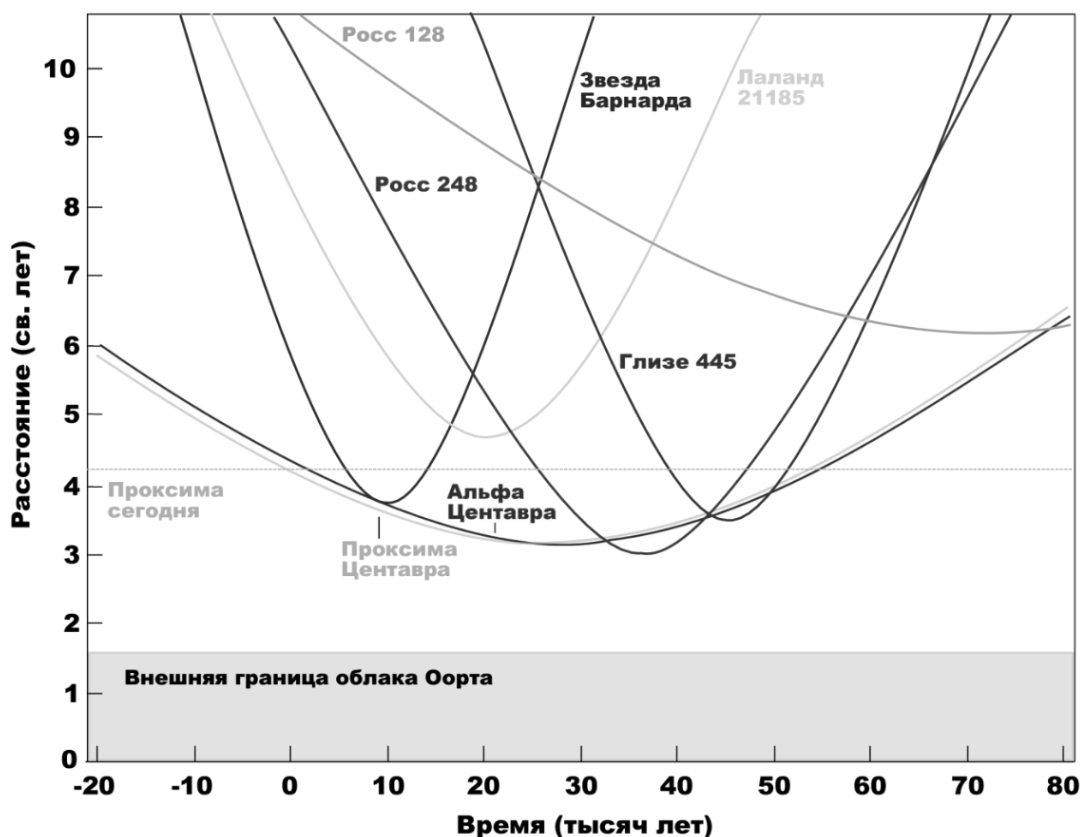


Рис. 4.2. Изменения расстояний от Солнца до ближайших звёзд за 80 тыс. лет.

Из этого рисунка видно, что в ближайшие 100 000 лет четыре звезды приблизятся к Солнцу на расстояние ближе 4 св. лет — это расстояние на котором находится ближайшая звезда сегодня. Однако, максимальное сближение для всех этих звёзд составляет около 3 св. лет, т. е. ждать, что оно окажет на Солнечную систему какое-то серьезное воздействие, не приходится.

Оценим частоту пролёта звёзд мимо Солнца на минимальном расстоянии  $r_{\min}$ . Считая направления пекулярных скоростей звёзд случайными величинами, равномерно распределёнными по сфере, получаем, что частота пролёта звёзд на расстоянии  $r < r_{\min}$  пропорциональна площади круга радиусом  $r_{\min}$ , т. е.  $r_{\min}^2$ . В качестве нормировки возьмем данные с рисунка 4.2 — 4 сближения на расстояние меньшее 3.5 св. лет за 100 000 лет.

В итоге среднее время между пролётами получается равным

$$\langle T \rangle = (300\,000 \text{ лет}) \left( \frac{1 \text{ св. год}}{r_{\min}} \right)^2. \quad (4.1)$$

Последствия пролёта звезды через Солнечную систему могут различаться в зависимости от того насколько тесным будет пролёт.

### Прямое столкновение звезды с Солнцем

Рассмотрим самый драматичный случай – прямое столкновение пролетающей звезды с Солнцем. При этом, если вторая звезда похожа на Солнце,  $r_{\min} \sim 2$  радиуса Солнца ( $R_{\odot}$ ). Как показывают расчеты для типичных скоростей столкновения, такое столкновение вызовет выброс части массы из обеих звёзд, однако бóльшая часть массы сольется в одну более массивную звезду, которая, после некоторого периода релаксации, станет более горячей и увеличит свою светимость.

После столкновения объединенная звезда приобретет скорость примерно равную половине пекулярной скорости прилетевшей звезды (если ее масса близка к массе Солнца), т. е. примерно 20–40 км/с. Это приведет к потере внешних планет, начиная с Юпитера или Сатурна. Если скорость налетающей звезды будет направлена в плоскости эклиптики – орбиты оставшихся планет станут эллиптическими (чем дальше от Солнца, тем больше эксцентриситет). При прилете в перпендикулярном эклиптике направлении орбиты планет приобретут эксцентриситет и наклонение к современной плоскости эклиптики – концентрация орбит объектов к одной плоскости исчезнет. При касательном столкновении звёзд, которое является самым вероятным вариантом столкновения, образовавшаяся звезда приобретет очень быстрое вращение. Это может привести существенному возрастанию ее вспышечной активности.

Типичное время ожидания прямого столкновения звезды с Солнцем составляет  $\langle T \rangle_{\text{direcr}} \approx 1.4 \cdot 10^{19}$  лет, что на девять порядков больше возраста Вселенной. Так что такое событие интересно теоретически, но не реализуется в реальности.

## Пролёт через Солнечную систему

Другой вариант – пролёт через Солнечную систему, точнее через ту её часть, где находятся планеты. Для этого надо пролететь внутри орбиты Нептуна:  $r_{\min} < R_N \approx 4.5$  млрд км. Такой пролёт звезды гораздо слабее повлияет на Солнечную систему, чем прямое столкновение. Изменятся орбиты планет, но изменения будут не очень большими. Сильнее всего поменяются орбиты планет с большими полуосями орбит, близкими к  $r_{\min}$ . Типичное время ожидания пролёта звезды внутри орбиты Нептуна составляет  $\langle T \rangle_N \approx 1.3 \cdot 10^{12}$  лет. Это время в 100 раз превышает возраст Вселенной, следовательно, вероятность пролёта другой звезды через Солнечную систему внутри орбиты Нептуна в течение 14 млрд лет составляет 1% или меньше.

На сами звёзды пролёт никакого влияния не оказывает. Исключением являются крайне маловероятные случаи прямого столкновения звёзд и их приливного захвата (см. ниже).

Звёзды движутся друг относительно друга по гиперболическим траекториям. Однако при далеких пролётах влияние их взаимного тяготения мало и эти гиперболы практически не отличаются от прямых. При более тесном сближении гравитация начинает оказывать влияния. Очень далеко от Солнца приближающаяся звезда движется с некоторой скоростью  $u_0$ . При приближении к Солнцу скорость движения звезды увеличивается, в точке максимального сближения она достигает значения  $u_{\max} > u_0$ . После этого звёзды удаляются и «звезда-гостья» улетает на бесконечность с той же скоростью  $u_0$ , с которой она приближалась к Солнечной системе. Траектория пролетающей звезды «огибает» Солнце – оно лежит в плоскости траектории с вогнутой стороны гиперболы.

Никакой возможности «задержаться» или «остаться» в Солнечной системе у пролетающей звезды нет (исключением является случаи столкновения или приливного захвата, о чем уже было сказано). При пролёте возможны случайные столкновения с астероидами и даже планетами. Вероятности таких столкновений низки, и они никак не могут повлиять на пролёт звезды.

Совсем недавно мы наблюдали два подобных пролёта, правда не звёзд, а небольших межзвёздных тел через Солнечную систему. В 2017 году мимо Солнца пролетел межзвёздный астероид Оуму-амау (1I/Oumuamua или 1I/2017U1). Он влетел в Солнечную систему из созвездия Киля со скоростью  $v_0 = 26$  км/с, пролетел внутри орбиты Меркурия с  $v_{\max} = 88$  км/с и улетел в созвездие Лиры, примерно в направлении Веги с той же скоростью 26 км/с. Траектория астероида сквозь Солнечную систему показана на рисунке 4.3.

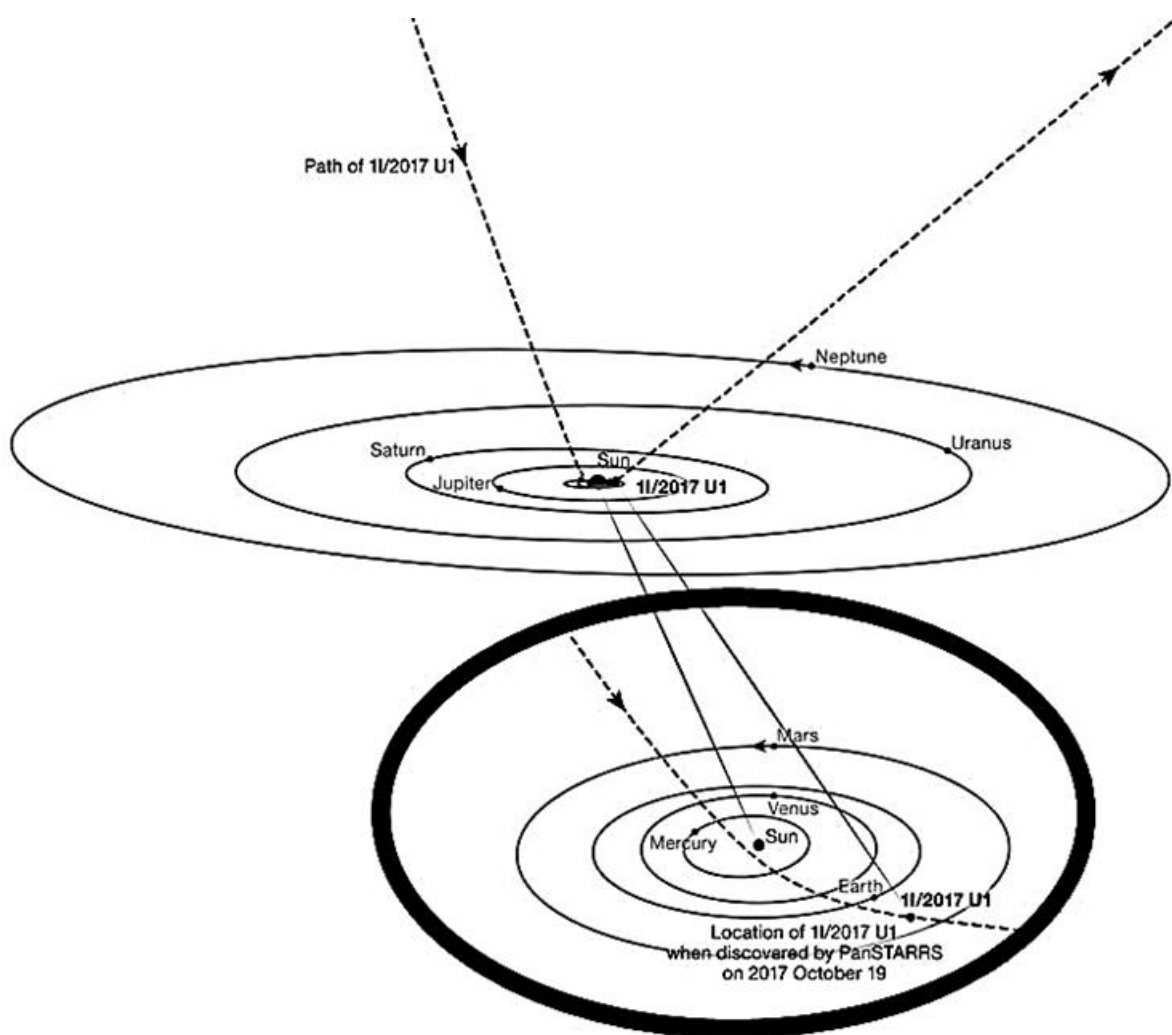


Рис. 4.3. Траектория межзвёздного астероида Оумуамау в Солнечной системе.

Спорят о том, не может ли этот астероид быть кометой, поскольку при вылете из Солнечной системы у него были отмечены негравитационные ускорения, но, вероятно, этот спор останется

неразрешённым.

Вторым объектом считается межзвёздная комета Борисова (2I/Borisov), открытая в 2019 году. Эта комета влетела в Солнечную систему со скоростью  $v_0 = 30$  км/с, приблизилась к Солнцу на 2 а.е. (за орбитой Марса, примерно внутренняя граница Главного пояса астероидов) и покинула Солнечную систему (см. [10]) .

### Приливной захват

Если сближение звёзд произойдет до минимального расстояния  $5-7 R_\odot$  то звёзды не столкнутся, но в момент максимального сближения будут испытывать сильные приливные возмущения. Если скорость сближения звезды с Солнцем на бесконечности при этом была мала, не обычные десятки, а  $1-3$  км/с, то относительная кинетическая энергия сближения будет затрачена на приливные возмущения звёзд, и звёзды образуют двойную систему. Заметим, что в момент сближения звёзды будут двигаться друг относительно друга примерно с параболическими скоростями. (Параболическая скорость – вторая космическая скорость – на поверхности Солнца равна 620 км/с). У образовавшейся двойной в начальный момент будет очень высокий эксцентриситет орбит компонентов и период обращения, вероятно, в несколько тысяч лет. Период очень сильно зависит от деталей приливного захвата.

При последующих сближениях приливы также будут оказывать действие на звёзды, в результате чего их орбиты вокруг общего центра масс будут становиться более круговыми (циркуляризоваться); удаление звёзд в перицентре будет возрастать (очень слабо), а в апоцентре очень быстро убывать. Через десятки или сотни тысяч орбитальных оборотов, что займет миллионы лет, орбиты звёзд станут почти круговыми. Угловой момент образовавшейся двойной звезды в ходе циркуляризации её орбиты практически сохраняется, лишь малая его часть может уйти на изменение скорости осевого вращения звёзд. Большая полуось круговой орбиты после циркуляризации не сможет более чем в два раза превышать расстояние начального пролёта, т. е.  $10-14 R_\odot$ , а это очень тесная двойная звезда.

За время циркуляризации Солнечная система будет разруше-

на – большинство планет и астероидов будут выброшены во внешнее пространство, часть упадет на сами звёзды. Это связано с тем, что в двойной звёздной системе устойчивое существование малых тел возможно только на иерархических орбитах (см. Рис. 4.4). Здесь возможны два случая, первый – когда тело движется вокруг одной из звёзд по орбите с радиусом, сильно меньшим полуоси орбиты двойной звезды. В этом случае основное воздействие на планету оказывает тяготение ближайшей звезды, а другая звезда только возмущает ее движение. Это так называемые «внутренние» орбиты или орбиты S-типа.

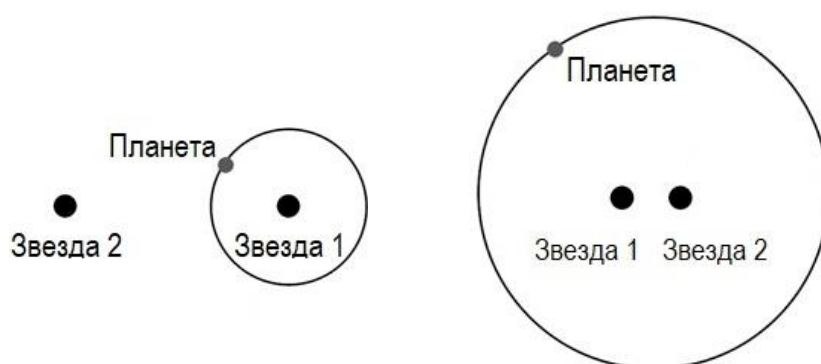


Рис. 4.4. Орбиты планет и астероидов в вокруг двойной звезды. Слева – орбита S-типа (внутренняя), справа – P-типа (внешняя).

Второй случай – «внешние» орбиты или орбиты P-типа – реализуется, когда орбита тела существенно больше орбиты двойной звезды и оно обращается вокруг двойной, которая становится единым центром тяготения.

В момент образования двойной звезды орбиты всех тел Солнечной системы будут относиться к типу S. В ходе циркуляризации орбит в двойной системе орбиты планет и астероидов попадают в зону неустойчивости, где их изменение предсказать невозможно. Та часть малых тел, которая переживает циркуляризацию, сохранив гравитационную связь с Солнцем и его новым компонентом, продолжить обращаться вокруг двойной по внешним орбитам. Сколько будет таких тел и как они будут распределены в пространстве – сказать трудно.



Большее значение  $r_{\min}$  увеличивает вероятность сближений звёзд на такое расстояние, но требование более низкой скорости сближения для выполнения приливного захвата возвращает вероятность приливного захвата примерно на тот же уровень как и вероятность столкновения. Соответственно, время ожидания приливного захвата Солнцем другой звезды буди примерно столь же большим, как время ожидания прямого столкновения. Можно утверждать, что астрофизическая катастрофа этого типа не произойдет никогда.

### Пролёт через облако Оорта

Само существование этого облака, которое является источником долгопериодических комет, пока является гипотезой. Размеры облака  $R_{OO}$  плохо известны, поэтому значение для него возьмем с рисунка 4.2, т. е. 1.5 светового года. Тогда из (4.1) при условии  $r_{\min} = R_{OO}$  получаем типичное время ожидания пролёта звезды в облаке Оорта  $\langle T \rangle_{OO} \approx 130\,000$  лет. Пролёт звезды через облако Оорта возмущает его и поток комет, попадающих во внутренние части Солнечной системы, возрастает, при этом Земля и планеты подвергаются усиленной кометной бомбардировке. Для более сильного возмущения облака звезда должна проникнуть в него глубже. Такое погружение вызовет более интенсивные кометные бомбардировки, но одновременно такие события будут происходить реже.

Пролёту звезды через планетную часть Солнечной системы и прямому столкновению звезды с Солнцем предшествует возмущение облака Оорта во время пролёта звезды сквозь него. При приливном захвате партнер Солнца на начальной стадии циркуляризации орбиты будет пролетать через внутренние области облака Оорта, и возмущать их на каждом орбитальном витке. Соответственно и в этих сценариях будет происходить кометная бомбардировка планет.

### Пролёт через Солнечную систему релятивистской звезды

Релятивистскими звёздами называют белые карлики, нейтронные звёзды и чёрные дыры звёздных масс. Все эти объекты появляются в конце ядерной эволюции обычных звёзд.

Белые карлики – это ядра звёзд с начальной массой меньше  $8\text{--}10 M_{\odot}$ , в которых завершились термоядерные реакции, а внешние оболочки звёзды рассеялись на стадии красного гиганта или сверхгиганта. Масса белого карлика обычно составляет  $0.5\text{--}0.8$  массы Солнца и не может превышать  $1.4 M_{\odot}$  (Чандрасеккаровский предел), а размеры такой звезды примерно как у Земли. Как следствие малых размеров плотность вещества белых карликов очень высока –  $10^6 \text{ г/см}^3$  (1 тонна в  $\text{см}^3$ ).

Светят белые карлики за счет внутренней тепловой энергии, их светимость со временем убывает. Некоторое время назад остывшие белые карлики с низкой светимостью предлагали называть «черными карликами», но этот термин не прижился.

Нейтронные звёзды образуются в конце эволюции массивных звёзд с массой больше  $10 M_{\odot}$ . Их эволюция завершается вспышкой сверхновой, которая сопровождается коллапсом ядра звезды. Сжатие ядра происходит до гигантских плотностей, сопровождается очень высоким давлением, при котором протонам и нейтронам энергетически выгоднее оказывается объединиться в нейтрон – происходит так называемый процесс «нейтронизации» вещества, откуда и название объектов (в обычных условиях нейтрон обладает большей энергией, чем сумма энергий протона и электрона, и распадается на них).

Типичная масса нейтронной звезды составляет  $1.4 M_{\odot}$  максимальная  $2.5\text{--}3.2 M_{\odot}$  (предел Оппенгеймера-Волкова), типичный радиус нейтронной звезды  $10\text{--}15 \text{ км}$ . Плотность вещества нейтронных звёзд составляет  $10^{14}\text{--}10^{15} \text{ г/см}^3$ , что несколько выше плотности ядер атомов.

Чёрная дыра – объект, гравитационное притяжение которого настолько велико, что покинуть его не могут даже частицы (тела), движущиеся со скоростью света. Граница области, которую не может покинуть свет, называется горизонтом событий, в некотором смысле это поверхность чёрной дыры. Чёрные дыры звёздных масс образуются в результате коллапса ядер в конце эволюции наиболее массивных звёзд с начальными массами больше  $25\text{--}35 M_{\odot}$ . Массы чёрных дыр, измеренные на гравитационно-волновых антеннах LIGO и Virgo при регистрации слияний в систе-

мах двойных чёрных дыр, составляют от 7 до 70  $M_{\odot}$ .

Существуют и другие пути возникновения чёрных дыр. Один из них — аккреция на нейтронную звезду. Она сколлапсирует в чёрную дыру при достижении предела массы Оппенгеймера-Волкова. Второй путь — слияние двух нейтронных звёзд или белых карликов. Возникающий объект будет по массе равен или немного меньше суммы масс сливающихся компонентов двойной звезды. При слиянии двух нейтронных звёзд эта сумма всегда превышает предел Оппенгеймера-Волкова и образуется чёрная дыра. При слиянии белых карликов возможны три исхода: их взрыв как термоядерной сверхновой типа Ia с полным разлетом вещества карликов; образование нейтронной звезды, также сопровождающееся феноменом сверхновой; образование чёрной дыры. Последний исход возможен только при слиянии наиболее массивных белых карликов 1.3–1.4  $M_{\odot}$  и при низком значении предела Оппенгеймера-Волкова (не более 2.3–2.8  $M_{\odot}$ ).

При пролёте таких звёзд через Солнечную систему ничего особенного не случится. Гравитационное воздействие релятивистских звёзд не отличается от воздействия обычных звёзд. (Их массы в несколько раз больше, чем средние массы обычных звёзд, но это не меняет картину воздействия принципиальным образом.)

Прямое столкновение с Землёй возможно, но его вероятность ниже, чем для столкновения с обычными пролетающими звёздами из-за малых размеров этих объектов. Сама вероятность столкновения с Землёй крайне низка, нужны миллионы пролётов звёзд через Солнечную систему (релятивистских или обычных), чтобы одно из них завершилось столкновением с Землёй.

Во время пролёта через Солнечную систему релятивистские звёзды будут аккрецировать солнечный ветер. При этом нейтронные звёзды и чёрные дыры будут испускать рентгеновское излучение, а белые карлики — жесткий ультрафиолет. Однако поток этого излучения будет мал и никакого вреда Земле нанести не сможет. Интересные астрофизические процессы произойдут при прямом столкновении релятивистской звезды с Солнцем. После столкновения релятивистская звезда, если её масса несильно превышает массу Солнца, быстро погружается в Солнце и оказывается в его

центре. Белый карлик в центре Солнца превратит его в красный гигант. Термоядерные реакции в белом карлике уже прошли. Начнутся реакции в веществе Солнца, расположенном на поверхности белого карлика – теперь ядра Солнца, в области с существенно более высокой гравитацией и, соответственно, давлением. Такая стадия, достигающаяся естественным путем в ходе эволюции звёзд, называется стадией слоевого источника, при этом на диаграмме Герцшпрунга-Рассела звезда занимает место на горизонтальной ветви.

Солнце на горизонтальной ветви (в ходе его естественной термоядерной эволюции) имело бы радиус  $2.2 R_{\odot}$ , температуру поверхности  $4700 \text{ K}$  и светимость  $41 L_{\odot}$ . Солнце с белым карликом внутри будет, конечно, иметь другие параметры.

Если в центр Солнца попадет нейтронная звезда, образуется так называемый объект Торна-Житковой. На нейтронную звезду начнется аккреция вещества Солнца. Темп аккреции будет ограничен давлением излучения, а светимость Солнца при этом увеличится примерно в  $100\,000$  раз (так называемая Эддингтоновская светимость  $L \approx 10^{38} \text{ эрг/с}$ ). Такой поток излучения выжжет все планеты Солнечной системы (может быть за исключением Нептуна). Стадия аккреции будет длиться примерно миллион лет, после чего на месте Солнца останется нейтронная звезда или чёрная дыра, если масса ядра Солнца превысит предел Оппенгеймера-Волкова. Для чёрной дыры небольшой массы процессы будут идти таким же образом.

Петербургский астрофизик Д. Яковлев утверждает, что при тех условиях, которые возникают на поверхности нейтронного ядра в объекте Торна-Житковой будут интенсивно генерироваться нейтрино. В этом случае темп аккреции может возрасти на несколько порядков, вплоть до  $1 M_{\odot}/\text{год}$ , при этом светимость в электромагнитном диапазоне останется Эддингтоновской, а вся остальная энергия, которая может быть на несколько порядков выше, излучается в виде нейтрино. Этот поток нейтрино столь велик, что может вызывать так называемый нейтринный катализ – нейтрино взаимодействуют с ядрами атомов вещества и превращают их в другие химические элементы. Это будет происходить и

в человеческом организме. Учитывая высокую проникающую способность нейтрино, защититься от этого потока невозможно. При возникновении потока нейтрино длительность стадии Торна-Житковой у Солнца очень плохо определена, она может длиться от года до тысяч лет.

Если в центре Солнца окажется чёрная дыра, поток нейтрино при аккреции на неё не возникает.

Как мы видели выше все чёрные дыры, слияния которых зарегистрированы в экспериментах LIGO и Virgo имеют массы больше  $7 M_{\odot}$ . Конечно, тут присутствует эффект селекции, более массивные двойные чёрные дыры излучают гравитационные волны большей мощности, соответственно, регистрируются с больших расстояний, из большего объема пространства и, следовательно, чаще. Но и менее массивные чёрные дыры есть.

Если произойдет прямое столкновение Солнца с чёрной дырой массой  $5-7 M_{\odot}$  или выше, то процесс будет происходить по-другому. Приливные силы чёрной дыры разорвут Солнце, его вещество образует вокруг чёрной дыры аккреционный диск, вещество из которого будет выпадать на чёрную дыру. Диск будет светить в разных диапазонах от рентгена до видимого и инфракрасного. Жёсткое излучение будет испускаться в конусах вдоль оси диска, видимое и инфракрасное – во всех направлениях. Светимость диска быстро выйдет на пик, а затем будет постепенно убывать. Через несколько лет или десятков лет вещество в диске закончится и в центре Солнечной системы останется чёрная дыра со слегка увеличившейся массой.

Следует учесть, что релятивистские звёзды составляют около процента от числа обычных звёзд в нашей Галактике. Соответственно, время ожидания прямого столкновения с Солнцем релятивистской звезды станет еще на два порядка больше, чем для обычной звезды  $\langle T \rangle_{WD,NS,BH} \approx 10^{21}$  лет, то есть это событие еще более маловероятно.

## 4.2. Пересечение Солнечной системой диска Галактики

Солнце вместе с остальными звёздами диска Галактики дви-

жется вокруг центра нашей Галактики по почти круговой орбите. Скорость кругового движения Солнца составляет 220 км/с, полный оборот оно делает за 225–250 млн лет.

Помимо этого, Солнце совершает вертикальные колебания относительно диска Галактики. В настоящий момент Солнце находится примерно на 15–20 пк над плоскостью Галактики и продолжает удаляться от него, через некоторое время удаление прекратится, и Солнце начнет приближаться к плоскости Галактики, пересечет её и станет удаляться в другую сторону (см. Рис. 4.5).

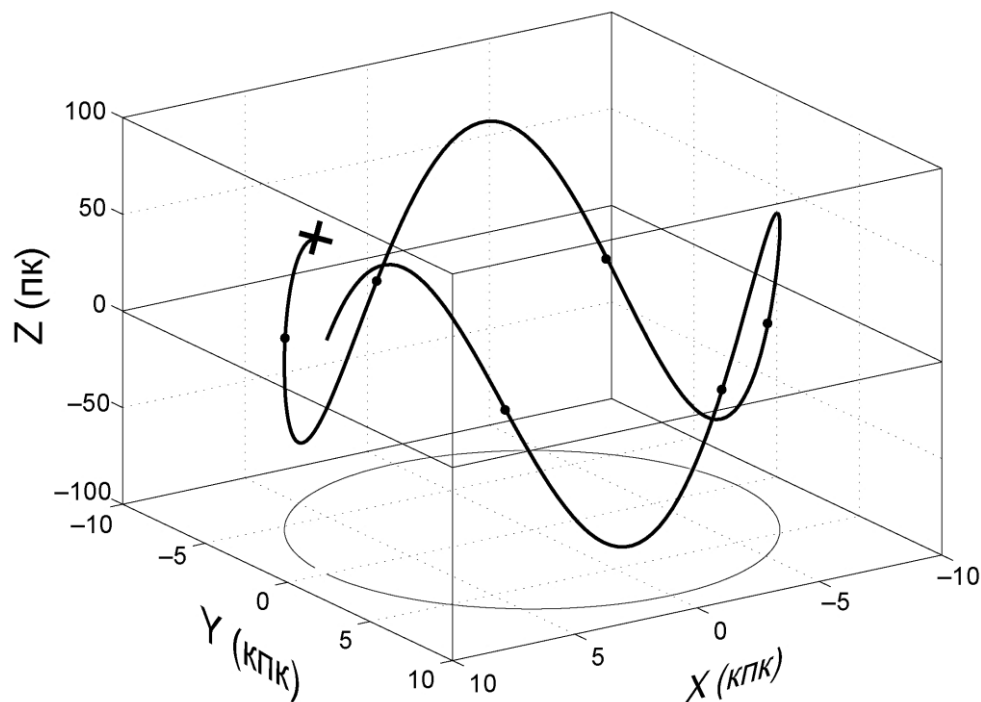


Рис. 4.5. Движение Солнца вокруг центра Галактики и его вертикальные колебания относительно плоскости Галактики. Показан один оборот вокруг центра Галактики. Масштаб по вертикальной оси  $Z$  в 1000 раз больше, чем по горизонтальным осям  $X$  и  $Y$ . Пересечения плоскости галактики отмечены точками, крестом – текущее положение Солнца

Период вертикальных колебаний Солнца составляет около 60 млн лет, а плоскость Галактики Солнце пересекает дважды за каждый период вертикальных колебаний, т. е. примерно каждые 30 млн лет.

В плоскости диска Галактики плотность вещества достигает максимального значения, а направленная поперек диска компонента силы тяготения быстро меняется и имеет разные знаки по

обе стороны плоскости. При пересечении плоскости Галактики Солнечная система испытывает «приливной удар», который мог бы возмутить наиболее протяженную составляющую Солнечной системы – облако Оорта и вызывать последующий пик кометной опасности. Однако перепад поля тяготения в масштабах Солнечной системы невелик, и вызываемый им в облаке Оорта эффект мал.

«Приливной удар» при пересечении плоскости Галактики может оказаться гораздо сильнее, если верным окажется предположение, сделанное Гарвардскими физиками Лизой Рендалл и Мэттью Рисом (см. [4.1], популярное изложение в [4.2]). Внутри диска Галактики, состоящего из обычного барионного вещества, может содержаться более тонкий и плотный диск из так называемой тёмной материи. Для того, чтобы такой тонкий диск тёмной материи образовался, к её свойствам предъявляются некоторые дополнительные требования. Обычно, тёмную материю считают бездиссипативной, из-за чего ее распределение оказывается более «размазанным», чем у обычного вещества. По расчетам Рендалл и Риса именно такой тонкий диск темной материи вызывает достаточно сильные возмущения облака Оорта, чтобы породить «кометные бомбардировки» внутренних частей Солнечной системы.

При этом выпадения комет, порожденные пересечением диска Галактики, будут происходить периодически, каждые 30 млн лет, в отличие от близких пролётов звёзд, которые случайно распределены во времени. Это позволяет определить периодичность, которую некоторые исследователи видят в образовании ударных кратеров на Земле и на Луне, и в массовых вымираниях, которые обнаружила палеонтология.

## **4.3. Близкий взрыв сверхновой**

### **4.3.1. Общие сведения о сверхновых**

Вспышка сверхновой – явление, в ходе которого светимость звезды резко увеличивается в  $10^4$ – $10^8$  раз, а затем сравнительно медленно затухает. Вспышка сверхновой происходит в конце

эволюции некоторых звёзд и сопровождается сбросом оболочки звезды и выделением огромного количества энергии.

По физическим механизмам различают два типа сверхновых: термоядерные и коллапсирующие. По астрономической классификации термоядерными являются сверхновые типа Ia, а коллапсирующими – все остальные (Ib, Ic или II).

### Термоядерные сверхновые

Термоядерная вспышка сверхновой происходит при сильном сжатии большого количества вещества (порядка массы Солнца), в котором способны проходить термоядерные реакции. Такими объектами являются белые карлики, а их катастрофическое сжатие наступает при приближении к Чандрасекаровскому пределу массы – верхнему пределу массы белых карликов, который, в зависимости от их химического состава, равен  $M_{Ch} = 1.4\text{--}1.44 M_{\odot}$ .

Обычно одиночный белый карлик устойчив. Его масса возрастает из-за захвата вещества межзвёздной среды, но темп этой аккреции очень мал. Существенный рост массы белого карлика возможен только в двойной системе. При этом возможны две ситуации: вторым компонентом системы является обычная невырожденная звезда, которая заполняет полость Роша и аккрецирует на белый карлик. Другой вариант – сближение под действием излучения гравитационных волн и последующее слияние двойной системы белых карликов.

Белые карлики различаются по химическому составу, который зависит от того на каких химических элементах останавливаются термоядерные реакции в ядре звезды и связан с массой карлика. Массы гелиевых (He) белых карликов не превышают  $0.5 M_{\odot}$  и, кислород-углеродные (C-O) белые карлики достигают  $1.2 M_{\odot}$  и, наконец, самые тяжелые (по атомному весу элементов, определяющих химический состав) неон-магниевые (Ne-Mg) белые карлики могут иметь массу вплоть до Чандрасекаровского предела.

Гелиевые белые карлики не могут породить термоядерную сверхновую. При аккреции его масса должна возрасти на  $0.9 M_{\odot}$  или более, что практически невозможно. Слияние двух гелиевых белых карликов образует аномально тяжелый гелиевый карлик, однако его масса не достигает Чандрасекаровского предела и



вспышки сверхновой не происходит.

С-О белые карлики могут достигать верхнего предела массы и коллапсировать из-за аккреции в двойной системе. Для Ne-Mg карликов ситуация немного другая – термоядерные реакции в их центре, вызывающие взрыв сверхновой, могут начаться еще до достижения Чандрасекаровского предела.

Слияние любого двойного белого карлика, суммарная масса которого превышает Чандрасекаровский предел, вызывает вспышку сверхновой. Чаще всего термоядерные сверхновые происходят на С-О белых карликах из-за высокой частоты встречаемости этих объектов.

При достижении Чандрасекаровской массы белый карлик теряет устойчивость и начинает коллапсировать. При достижении критической плотности порядка  $2 \cdot 10^9$  г/см<sup>3</sup> в веществе начинаются термоядерные реакции. Обычно это происходит в центре карлика. По белому карлику от центра к поверхности пробегает взрывная волна термоядерного горения, в которой С и О превращается в Si, а он в свою очередь в радиоактивный <sup>56</sup>Ni.

Часть массы белого карлика в ходе коллапса может образовывать сверхплотный объект – нейтронную звезду. Это происходит только при коллапсе самых массивных белых карликов. Остальная часть вещества выбрасывается в окружающее пространство. В остальных случаях коллапсирующий белый карлик (слившиеся карлики) взрываются без остатка. Все их вещество выбрасывается в пространство.

Выброшенное вещество содержит большое количество <sup>56</sup>Ni, который с выделением энергии превращается в радиоактивный <sup>56</sup>Co, а тот в стабильный <sup>56</sup>Fe. В этих распадах испускаются  $\gamma$ -лучи и электроны с энергиями порядка МэВ.

### Коллапсирующие сверхновые

Второй тип объектов, приводящий к феномену сверхновой, – массивные звёзды, ядерные реакции в центре которых приводит к образованию элементов железного пика. Начальная масса таких звёзд должна быть больше 8–10  $M_{\odot}$ , но не может превышать 40–50  $M_{\odot}$ . В ядре начинают протекать ядерные процессы, порождающие нейтрино, которые уносят энергию из всего объема ядра.

Эти процессы приводят к потере стабильности и далее к гравитационному коллапсу ядра.

Внутренняя часть ядра массой  $1.4\text{--}1.5 M_{\odot}$  превращается в нейтронную звезду. Выделяющаяся при сжатии ядра энергия превышает энергию связи оболочки звезды. Внешние части коллапсирующего ядра «отскакивают» от сформировавшейся нейтронной звезды, по оставшейся части ядра и оболочке звезды из центра наружу пробегает сильная ударная волна, которая сбрасывает и нагревает оболочку звезды.

При массе больше  $40\text{--}50 M_{\odot}$  в центре звезды образуется чёрная дыра, отскока от нее не происходит. В результате такого коллапса только небольшая часть оболочки может быть сброшена в пространство. Феномен сверхновой при таком коллапсе может быть намного слабее или полностью отсутствовать.

Типичная энергия вспышек сверхновых составляет  $10^{51}$  эрг. Для них в астрофизике даже введена внесистемная единица энергии «foe» (fifty one ergs):  $1 \text{ foe} = 10^{51}$  эрг.

#### 4.3.2. Опасные явления, связанные со сверхновыми

Во время и после вспышки сверхновых происходит ряд явлений, которые могут представлять опасность для Земли. Перечислим их.

1) В момент выхода ударной волны на поверхность коллапсирующей звезды или взрывающегося белого карлика происходит очень сильный разогрев вещества их поверхности, сопровождающийся короткой (секунды), но чрезвычайно мощной ультрафиолетовой вспышкой.

2) Расширение оболочки сопровождается увеличением её светимости, пока оболочка остается оптически толстой, затем её светимость быстро падает. Максимум светимости оболочки наступает через  $15\text{--}30$  дней. Дополнительный вклад в свечение оболочки вносит рекомбинация водорода, порождающая поток жестких ультрафиолетовых квантов с энергией около  $13.6$  эВ.

3) Другой процесс на ранних стадиях расширения оболочки сверхновой – распад радиоактивных элементов  $^{56}\text{Ni}$  и  $^{56}\text{Co}$ , сопро-

вождающийся испускание гамма-лучей и электронов МэВных энергий. Этот процесс длится примерно 100 дней и особенно важен в термоядерных сверхновых типа Ia.

Ультрафиолетовые и гамма-лучи распространяются в космическом пространстве прямолинейно, а электроны отклоняются межзвёздными магнитными полями, в результате чего волна электронов отстаёт от световой волны- и растягивается во времени.

4) Сброшенная оболочка звезды разлетается со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Она сгребает окружающую сверхновую вещество и постепенно тормозится. В результате образуется остаток сверхновой – плотная сферическая оболочка, внутри которой находится разреженный очень горячий ионизованный газ (несколько миллионов градусов). Также внутри оболочки находятся высокоэнергичные космические лучи, ускоряемые и удерживаемые спутанными магнитными полями. У половины остатков сверхновых основным источником космических лучей является быстро вращающаяся молодая нейтронная звезда с сильным магнитным полем (пульсар). Остаток сверхновой существует несколько миллионов лет, а после рассеивается и смешивается с межзвёздной средой. Типичные размеры остатков сверхновых на момент прекращения их расширения составляют 20–40 пк, максимум 50–60 пк.

5) Механизм Ферми ускоряет протоны внутри оболочки сверхновой до энергий 0.1–3 ПэВ. Частицы таких энергий не удерживаются внутри остатка и покидают его. Остатки сверхновых служат источниками галактических космических лучей сверхвысоких энергий. Космические лучи, покинувшие остаток сверхновой, распространяются через хаотические магнитные поля межзвёздной среды. Частицы движутся не по прямым линиям и достигают Солнечной системы за более долгое время по сравнению с фотонами.

#### 4.3.3. Воздействие близких Сверхновых на Землю

Все перечисленные опасные явления могут представлять опасность для биосферы Земли (именно для жизни на Земле, т. к.

для Земли как планеты и для остальных тел Солнечной системы эти явления опасности не представляют.)

Подробного исследования проблемы воздействия близких сверхновых на Землю еще нет. Есть ряд работ, посвященных этой проблеме, результаты которых не очень хорошо согласуются между собой. Рассмотрим основные механизмы воздействия сверхновых на Землю.

### 1) Яркий источник света.

Типичная светимость сверхновых в максимуме составляет  $10^{42}$ – $10^{44}$  эрг/с. То есть все сверхновые являются мощными источниками оптического излучения.

Эффекты излучения в видимом диапазоне могут быть значительными. Сверхновая на расстоянии 50 пк будет примерно такой же яркой, как полная Луна. Поскольку сверхновая – точечный источник света, она будет видна и при дневном свете. На ночной стороне Земли она осветит все небо. На начальной стадии вспышки в излучении сверхновой присутствует избыток голубых лучей, после максимума блеска и по мере затухания оно краснеет. Существует много публикаций о вредном воздействии ночного синего света на живые организмы (обзор литературы можно прочесть в [4.3], см. также раздел 8 данной книги). Среди них есть гормональные и поведенческие эффекты. Такой свет может вызывать бессонницу у людей и даже повышать уровень заболеваемости раком. Возможно воздействие на урожай. Длительность этой фазы около двух недель.

Серьезной астрофизической опасностью яркий видимый свет от сверхновой, по-видимому, не является.

### 2) Разрушение озонового слоя.

Атмосфера Земли непрозрачна в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах электромагнитного излучения. Такое излучение поглощается в верхних слоях атмосферы и не проникает ниже 150–50 км. Ультрафиолетовое излучение очень сильно поглощается озоном ( $O_3$ ) в озоновом слое Земли, расположенном на высоте от 20 до 40 км. Процессы поглощения иллюстрируются рисунком 4.6. Заряженная компонента космических лучей – электроны

и протоны – также поглощается атмосферой.



Рис. 4.6. Прохождение электромагнитного излучения через земную атмосферу. По ординате отложена высота в атмосфере, до которой проникает космическое излучение в данной области спектра.

<https://22century.ru/space/82824>.

Основными газами, входящими в состав атмосферы Земли у ее поверхности, являются молекулярные азот  $N_2$  и кислород  $O_2$ . Такой же состав сохраняется и на высотах до 100 км. В обычных условиях азот  $N_2$  и кислород  $O_2$  между собой слабо взаимодействуют. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, а также космические лучи отдают свою энергию в стратосфере или под ней, разбивая молекулы и выбивая электроны из атомов. Это приводит к образованию активных атомарных кислорода и азота, их радикалов и ионов из которых образуются оксиды азота  $NO$ ,  $NO_2$ . В свою очередь эти молекулы интенсивно взаимодействуют с озоном  $O_3$  и превращают его в кислород  $O_2$ , что приводит к истощению или даже полному разрушению озонового слоя.

Возможны четыре сценария воздействия на озоновый слой:

а) Воздействие первичной ультрафиолетовой вспышки на атмосферу. Длительность ультрафиолетовой вспышки не превышает нескольких минут. Поэтому оксиды азота образуются в атмосфере над одним полушарием Земли. За несколько суток стратосферные течения разнесут и перемешают образовавшиеся элементы по всей атмосфере. Разрушение озонового слоя будет происходить повсеместно.

б) Воздействие ультрафиолетового излучения расширяющейся оболочки сверхновой и рентгеновских лучей из-за распада  $^{56}\text{Ni}$  в ней. Сценарий аналогичен предыдущему за исключением того, что поток жесткого излучения от сверхновой длится десятки суток.

Для обоих описанных случаев количество производимых вспышкой оксидов азота обеспечивает деградацию озонового слоя в течении 3–15 лет. Это время существенно больше длительности вспышки жесткого излучения и в первом и во втором случаях.

В работе [4.4] получены следующие уровни деградации в зависимости от количества поглощенной энергии: 10 кДж/м<sup>2</sup> приведет к разрушению 68% озонового слоя за время порядка месяца, 100 кДж/м<sup>2</sup> и 1000 кДж/м<sup>2</sup> разрушит за это время, соответственно, 91% и 98% озонового слоя. Первый случай нанесет заметный ущерб жизни на Земле, последний – вызовет катастрофическое вымирание. В обоих сценариях эффективная деградация возможна при удалении сверхновой от Солнца не более чем на 8–10 пк.

в) Воздействие галактических космических лучей, порождаемых остатком сверхновой, также приводит к образованию оксидов азота из  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ . Но период, в течение которого атмосфера Земли облучается космическими лучами, существенно длиннее. В этом случае период деградации озонового слоя совпадает с периодом облучения Земли.

В расчетах, проведенных в работе [4.5], было смоделировано распространение космических лучей в межзвёздной среде с учетом их отклонения хаотическими магнитными полями и поглощения в межзвёздной среде. Уровень достигших Земли космических

лучей сравнивался с фоновым уровнем галактических космических лучей в Солнечной системе. Также вычислялся уровень деградации озонового слоя. Эти данные приведены в таблице 4.1. На рисунке 4.7 показана деградация озонового слоя со временем.

Таблица 4.1 Воздействие космических лучей от близкой сверхновой.

Расстояние до сверхновой, пк	Повышение уровня космических лучей (разы)	Достижение максимума, лет	Снижение уровня озона
10	1000	100	100%
20	200	100	62%
50	10	1000	17%
100	1–3	3000	3%

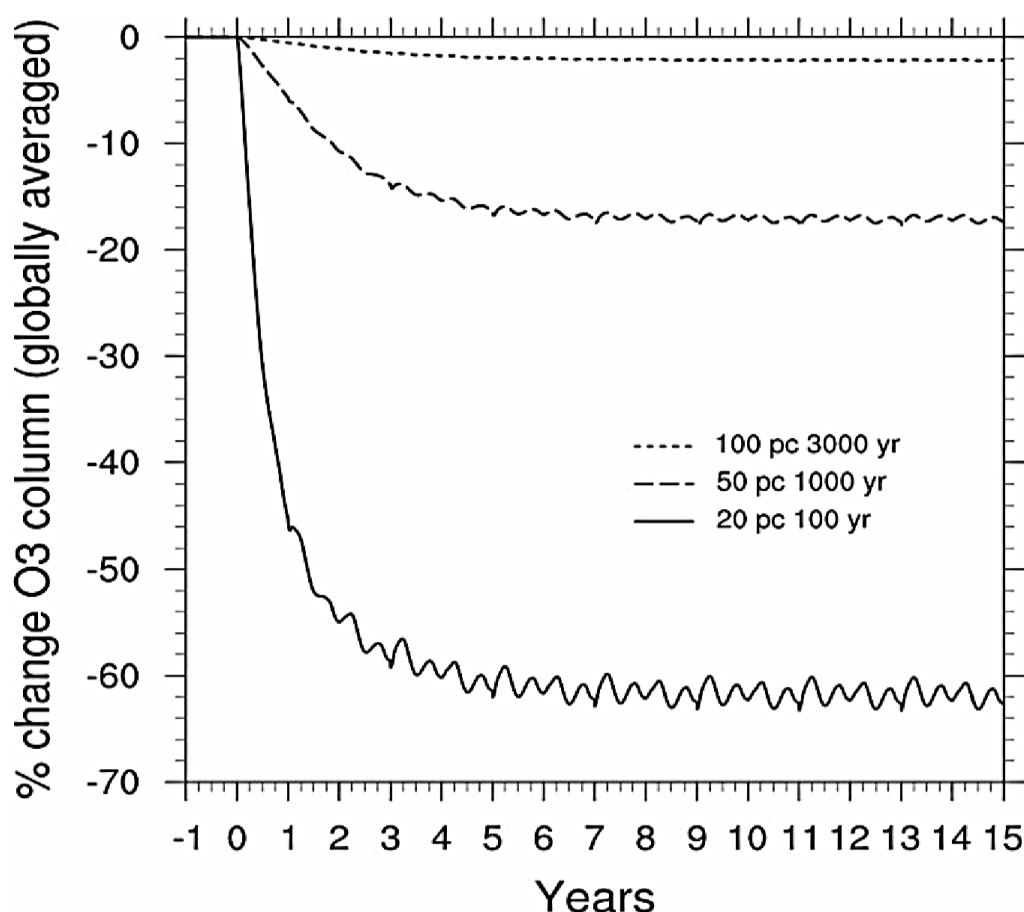


Рис. 4.7. Средние изменения плотности озона в атмосфере Земли.

г) Если Солнечная система попадает внутрь остатка сверхновой, то всё время пребывания в нем, до вылета из остатка или до его диссипации, атмосфера Земли будет облучаться космическими лучами. Внутри остатка энергия заряженных частиц в среднем меньше, чем у покидающих его, но интенсивность потока частиц будет существенно выше. В итоге, всё время пребывания внутри остатка, которое может достигать миллиона лет, у Земли будет разрушен озоновый слой.

Следует описать последствия деградации или разрушения озонового слоя Земли для ее биосферы. Интенсивное ультрафиолетовое излучение поражает человеческий организм. Лучи УФ-А (400–315 нм) положительно воздействуют на него, способствуют загару и выработке витамина D, если не превышать дозу облучения. В то же время УФ-В (315–280 нм) и УФ-С (280–100 нм) губительны для здоровья. Чрезмерное облучение из-за истончения озонового слоя вызывает: головную боль; поражение иммунной системы; нарушение состава крови; задержку роста; солнечные ожоги; раковые поражения кожи; поражение глаз; помутнение хрусталика. Истощение озонового слоя на 25% приведет к увеличению УФ-В на поверхности примерно на 50%.

Нарушение озонового слоя неблагоприятно воздействует на экологию и биосферу. Серьезнейшая проблема возникает для морских обитателей. Важной пищевой цепью для рыб и других морских обитателей является фитопланктон, живущий у поверхности воды. Чрезмерное ультрафиолетовое излучение убивает фитопланктон, разрывая пищевые цепочки.

Жесткий ультрафиолет отрицательно влияет на растительный мир. Оно изменяет форму, размер растений, снижают продолжительность их жизни, неблагоприятно сказывается на распределении питательных веществ. Все это приводит к снижению количества растительной массы, неблагоприятно сказывается на процессах фотосинтеза.

При значительном уменьшении количества озона в атмосфере погибнет значительная часть растений и также микроорганизмов. Фотосинтез на планете почти прекратится, что повлечет увеличение концентрации углекислоты и повышение температуры



планеты (см. раздел про климатическую катастрофу). Животные и люди будут получать сильные солнечные ожоги даже после нескольких минут пребывания под Солнцем. В результате этого люди и животные будут массово болеть и даже умирать. В итоге планетарная экосистема будет разрушена. Можно ожидать массового вымирания животных и растений.

### 3) Взаимодействие космических лучей с атмосферой Земли.

Взаимодействие космических лучей сверхновой с атомами и молекулами в атмосфере Земли не только привозит к химическим реакциям, разрушающим озоновый слой, которые были описаны выше, но и порождает другие процессы, вредные для людей и биосферы Земли.

Попадая в атмосферу, космические лучи взаимодействуют с атомами воздуха и генерируют вторичные космические лучи. Космические лучи, попадающие в атмосферу из космического пространства, называют первичными. В результате в атмосфере происходит каскад рождения частиц. Такие каскады называют широкими атмосферными ливнями (частиц). Схема развития широкого атмосферного ливня и изменение числа частиц в нем с высотой иллюстрируются рисунком 4.8.

Вторичное космическое излучение делят на три компонента, по их взаимодействию с веществом (с атмосферой):

- частицы с сильным взаимодействием (адроны): вторичные нейтроны и  $\pi$ -мезоны;
- электрон-фотонный компонент: гамма фотоны, электроны, позитроны;
- прочие заряженные частицы: мюоны, электроны и др.

Основная часть наблюдаемого потока галактических космических лучей вызвана первичными протонами с энергиями от  $10^{11}$  эВ и выше. Площадь атмосферного ливня увеличивается с ростом энергии породившей его первичной частицы.

Протон с энергией  $10^{15}$  эВ рождает до миллиона частиц, с энергией  $10^{16}$  эВ — до десяти миллионов частиц, а с энергией  $10^{20}$  эВ — до миллиарда. Протоны с энергией  $10^{20}$  эВ встречаются довольно редко, на квадратный километр поверхности Земли падает примерно одна столь энергичная частица в год.

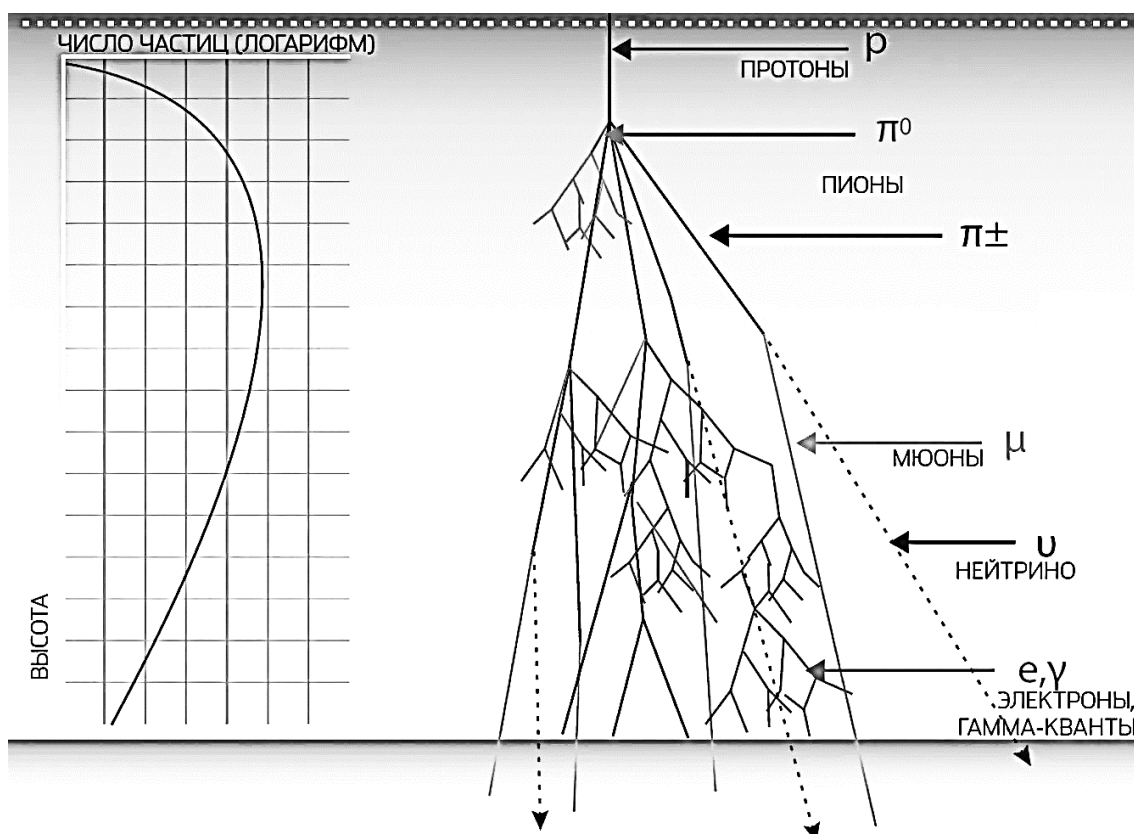


Рис. 4.8. Справа: Схема развития широкого атмосферного ливня из энергичного первичного протона. Слева: Изменение числа частиц в ливне с высотой. Максимум кривой расположен на высоте 10–15 км.

Эксперименты показали следующие свойства атмосферных ливней [4.6]:

- в максимуме развития ливня основными частицами в нём являются электроны;
- поверхности Земли достигают в основном мюоны;
- максимальное число частиц в ливне пропорционально энергии ливня; т. е. энергии первичной частицы;
- в максимуме ливня на одну частицу приходится примерно 1.4 ГэВ;
- высота максимума ливня в атмосфере Земли зависит от энергии первичной частицы — чем она больше; тем ниже будет расположен максимум;
- интенсивность вторичных нейтронов и  $\pi$ -мезонов сначала резко возрастает; а затем экспоненциально уменьшается;

- число электронов также сначала резко растёт; а затем быстро спадает;
- число мюонов с энергией выше 3 ГэВ убывает медленно; менее энергичных — по экспоненте.

Рассмотрим две наиболее интенсивные у поверхности Земли компоненты вторичных космических лучей.

а) Нейтроны (вторичные нейтроны).

Регистрируемый сегодня на Земле поток нейтронов во вторичных космических лучах сильно зависит от географической широты (так называемый широтный эффект). Это показывает, что большая часть вторичных нейтронов образуется первичными частицами сравнительно небольших энергий, на которые магнитное поле Земли оказывает заметное влияние.

Интенсивность потока вторичных нейтронов экспоненциально быстро убывает с глубиной в атмосфере, в результате чего на уровне моря или на уровне гор поток нейтронов весьма мал.

Экспериментальные исследования изменения потока вторичных нейтронов в атмосфере были проведены с помощью шаровзондов. Измерения показали, что максимум числа нейтронов расположен на высоте примерно 12 км (см. Рис. 4.9) [4.6].

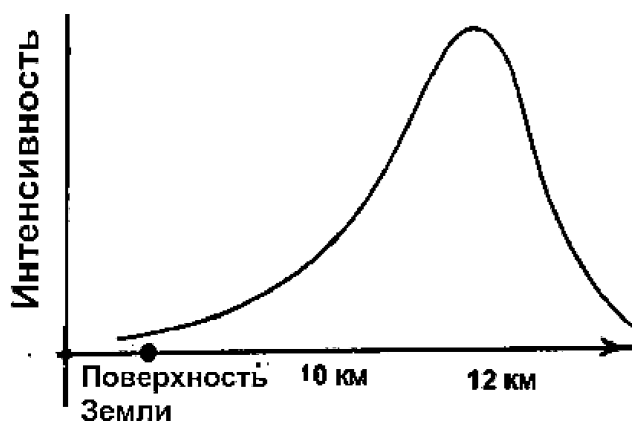


Рис. 4.9. Изменение интенсивности потока вторичных нейтронов с высотой по экспериментальным измерениям.

При вспышке сверхновой на расстоянии большем 20 пк фон первичных космических лучей возрастает не более, чем в 100–200 раз (см. таблицу 4.1). Поток вторичных нейтронов возрастет

во столько же раз и не будет нести прямой опасности. Оценка последствий долговременного повышения уровня потока нейтронов требует отдельного исследования.

При вспышке сверхновой на расстоянии 10 пк и ближе поток первичных космических лучей и пропорциональный ему поток вторичных нейтронов возрастет в 1000 и более раз (см. таблицу 4.1). Такая интенсивность нейтронного облучения уже может нести непосредственную опасность.

#### б) Мюоны.

Мюон (обозначение  $\mu$  или  $\mu^-$ ) – отрицательно заряженная элементарная частица, похожая на электрон, но с массой примерно в 207 раз больше. Мюон нестабилен, время его жизни в покое или при нерелятивистских энергиях примерно  $2 \cdot 10^{-6}$  с. Мюоны не участвуют в сильных взаимодействиях, из-за чего обладают высокой проникаемостью.

Мюоны появляются, в основном, в результате распадов  $\pi$ -мезонов. Отметим некоторые особенности рождения мюонов в атмосферных ливнях. Наиболее энергичные мюоны появляются при распаде  $\pi$ -мезонов первого поколения, энергия которых наиболее велика. На больших высотах плотность атмосферы мала, и эти быстрые пионы успевают распасться. Ниже в атмосфере, в связи с распределением энергии первичной частицы между большим количеством вторичных частиц ливня,  $\pi$ -мезоны рождаются с меньшей энергией. Кроме того, с увеличением плотности атмосферы успевают распасться лишь  $\pi$ -мезоны с малой энергией. Из-за этого их спектр становится более крутым. Поэтому наибольший поток высокоэнергичных мюонов приходит к поверхности Земли в горизонтальном направлении, в котором толща атмосферы максимальна.

Как уже было сказано выше, поверхности Земли достигают в основном мюоны. Долгое время рождение мюонов в атмосфере Земли первичными космическими лучами от близких сверхновых не включалось в рассмотрение. Включение мюонов в расчеты показало, что их влияние на Земле оказывается существенным, особенно для сверхновых на умеренных расстояниях. Благодаря вы-

сокой проницаемости мюоны могут оказывать воздействие на жизненные формы на поверхности, а также на глубине до километра в воде или до нескольких сотен метров под землёй.

Недавние вычисления показали, что поток мюонов на поверхности Земли, ожидаемый от умеренно близкой сверхновой, удаленной на 50 пк [4.3] существенен. Доза излучения мюонов на уровне моря может легко возрасти с фонового уровня 0.2 мЗв/год до примерно 30 мЗв/год (т. е. увеличиться более чем в 150 раз). Для возвращения уровня облучения к исходному необходимо порядка 10 000 лет без учета возможности удержания космических лучей в Местном пузыре. При учёте удержания повышенный уровень радиации может сохраняться до 100 000 лет.

Отметим, что доза облучения на уровне 20–50 мЗв/год является допустимой дозой ежегодного облучения персонала атомных электростанций в различных странах. Эта доза не является смертельной, но может увеличить риск возникновения рака для долгоживущих организмов примерно на 5% за год воздействия. Скорости мутаций также возрастают аналогичным образом.

Мюоны от более близких сверхновых, на расстоянии 10 пк, будут давать примерно в 100 раз больший поток мюонов, который будет представлять уже реальную биологическую опасность.

Воздействие мюонов на живые организмы, отличается от воздействия других видов радиации. Обычно радиация не проникает очень глубоко внутрь организма. Исключение составляет попадание радиоактивных веществ внутрь организма, например, при вдыхании радона или употреблении радиоактивной пищи. Следовательно, доза будет пропорциональна площади поверхности организма, а доза на единицу массы будет меньше для более крупных организмов. В случае мюонов это не так.

Из-за высокой проникающей способности мюонов любые организмы для них почти прозрачны. Получаемая доза радиации будет пропорциональна их массе, а не площади поверхности. Поэтому, доза на единицу массы тканей будет постоянной для всех организмов, не зависимо от их массы и размеров. Соответственно, мюоны будут оказывать относительно большее влияние на крупные организмы по сравнению с другими видами радиации, и их

влияние будет наблюдаться в мегафлоре и мегафауне.

Воздействие мюонов отличается от других видов излучения, в первую очередь от ультрафиолета, тем, что они могут проникать глубоко в воду, под поверхность морей и океанов.

#### 4.3.4. Об опасных сверхновых

Приведем краткий итог предыдущего подраздела.

Реальную опасность жизни на Земле представляет вспышка сверхновой на расстоянии до 8–10 пк от Солнца. С этого расстояния сказываются все эффекты: первичная ультрафиолетовая вспышка, распад радиоактивного никеля и кобальта и поток первичных космических лучей. Размеры остатка сверхновой вполне могут превысить расстояние до Солнца и Солнечная система окажется внутри него.

Космические лучи представляют реальную угрозу и от сверхновой, удаленной от нас на 20 пк. Ультрафиолетовая вспышка и свечение расширяющейся оболочки с такого расстояния уже неопасны.

У сверхновых, удаленных на еще бóльшие расстояния (50 и 100 пк), космические лучи перестают представлять мгновенную угрозу жизни. Но поток космических лучей будет длиться сотни и тысячи лет, вопрос о его долговременном воздействии и вызываемых им мутациях требует отдельного изучения.

В зависимости от направления и скорости движения Солнца относительно Сверхновой оно может попасть внутрь остатка от вспышки, произошедшей на расстоянии от 20 до 90 пк.

#### Частота вспышек близких сверхновых

Вспышки сверхновых в Млечном Пути происходят примерно 1–2 раза в столетие. Если бы сверхновые в диске Галактики были распределены равномерно, то на расстояние 50 пк Солнце будет приближаться к ним в момент вспышки каждые несколько миллионов лет. А на расстояние 10 пк примерно раз в 0.5–1 миллиарда лет. Однако массивные звёзды, в конце эволюции которых происходят вспышки сверхновых, не распределены равномерно. Они образуются группами в спиральных рукавах Галактики, в областях

звездообразования. Время жизни таких звёзд не превышает 10–20 млн лет, они не успевают далеко уйти от места своего рождения и все взрываются почти одновременно. Из-за этого встречи Солнца с близкими сверхновыми будут происходить не равномерно по времени, а иметь высокую скважность. При средних значениях времени между встречами, приведенных в предыдущем абзаце, будет иметь место сильная группировка этих событий.

Близкое расположение предсверхновых и их почти одновременные вспышки могут приводить к тому, что рядом с Солнцем почти одновременно окажутся несколько близких сверхновых, и их воздействия сольются. Будет невозможно отличить такое множественное событие в прошлом от одиночной более мощной или более близкой вспышки сверхновой.

### Ближние сверхновые в прошлом

1) Массовые вымирания на Земле – указания на близкие сверхновые в далеком прошлом.

В последние 600 млн лет жизнь на Земле подверглась пяти крупным массовым вымираниям (т. н. «Большая Пятерка»), а также целому ряду более мелких вымираний [4.7]. Заметим, что жизнь на Земле зародилась 3.7–4.1 млрд лет назад. С той поры и до указанных 600 млн лет наверняка были и другие, более ранние вымирания, но современная палеонтология не может их зафиксировать. Вымирания за последние 600 млн лет были предметом интенсивных исследований, особенно в течение последнего десятилетия. Для объяснения всех или некоторых из этих вымираний было выдвинуто множество теорий. Среди них следует упомянуть массовый вулканизм и падение астероидов. Знаменитое массовое вымирание в конце мелового периода, когда исчезли динозавры, убедительно отождествляется с таким падением астероида, кратер от которого находится на полуострове Юкатан. В то же время рекордное пермское вымирание, по-видимому, могло быть вызвано эпизодом вулканической активности, создавшим сибирские ловушки. Среди астрофизических причин массовых вымираний отмечают вариации светимости Солнца, близкие взрывы сверхновых и кометную бомбардировку, вызванную возмущением облака Оорта.

Первый и последний механизмы рассматриваются в других разделах этой книги. Опасность от сверхновых вызвала меньший интерес у исследователей возможно, потому, что на нашей памяти не было недавнего более-менее близкого взрыва сверхновой, и, возможно, потому, что предполагаемая опасность близкого взрыва сверхновой не была надлежащим образом оценена.

В последние десятилетия появились несколько причин для пересмотра важности механизма близких сверхновых для объяснения по крайней мере некоторых массовых вымираний. Во-первых, более детальное понимание механизмов сверхновой, по результатам исследования сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом облаке. Это самая близкая вспышка сверхновой за последние 400 лет, поэтому ее удалось детально изучить. Во-вторых, идентификация гамма-источника Geminga с остатком сверхновой на расстоянии около 60 пк, которая, по-видимому, взорвалась около 300 000 лет назад, и открытие миллисекундного пульсара PSR J0437-4715 на расстоянии около 150 пк от Солнца, которые подтверждают, что близкие вспышки сверхновых не являются фантастическими событиями. Наконец, в последнее время было проведено много работ по изучению биологических последствий истощения озонового слоя, мотивированных наблюдавшейся антарктической озоновой дырой.

Достоверно отождествить какое-то из вымираний «Большой Пятерки» с близкой сверхновой сегодня нельзя, но их общее число более-менее соответствует частоте таких событий.

2) Близкая вспышка сверхновой примерно 2–6 млн лет назад.

В образцах грунта, доставленных миссиями «Аполлон» с Луны и в образцах отложений, поднятых из глубин океана были обнаружены следы изотопа  $^{60}\text{Fe}$ . Это радиоактивный изотоп с периодом полураспада равным 2.6 млн лет. Атомы этого изотопа, сохранившиеся в Земле и Луне на момент их образования полностью распались. Механизмов образования этого изотопа, которые могли бы привести к возникновению зарегистрированного его количества в Солнечной системе нет.

Такой изотоп возникает при вспышках сверхновых и затем за несколько миллионов лет распадается.



Количество изотопа, попадающего в Солнечную систему, зависит от расстояния до сверхновой (чем ближе вспышка, тем больше изотопа) и от прошедшего с момента вспышки сверхновой времени – чем больше времени прошло, тем меньше изотопа остаётся, остальное распадается.

На сочетание этих факторов можно наложить ограничение. Если сверхновая взорвалась более 5–6 млн лет назад, то она должна была быть настолько близкой, что вызвала бы сильное вымирание видов на Земле, которого не было. С другой стороны, расстояние до сверхновой не может превышать 30 пк, иначе бы изотоп на Землю не попал в таком количестве.

На Земле изотоп был обнаружен в 5 образцах пород с разными возрастами. Их анализ указывает на то, что к нам попали атомы  $^{60}\text{Fe}$  из сверхновой, взорвавшейся от 2 до 3 млн лет и, с меньшей достоверностью, из сверхновой с возрастом около 6 млн лет.

Возможно это были не отдельные сверхновые, а их группы.

#### Кандидаты на роль близких вспышек сверхновых.

1) Для вспышки сверхновой (с коллапсирующим ядром) начальная масса звезды должна быть больше  $8 M_{\odot}$ . В списке ближайших к Солнцу звёзд, показанных на рисунке 4.1 (до 12 световых лет), самая массивная звезда – Сириус – имеет массу  $2 M_{\odot}$ . На расстоянии до 10 пк звёзд такой массы тоже нет. Таким образом, нет опасности скорого взрыва одной из ближайших к нам звёзд как сверхновой.

#### 2) Кандидаты в сверхновые звёзды.

Предшественниками сверхновых типа Ia являются белые карлики, которые близки к пределу Чандрасекара и аккрецирующих вещество от звезды-компаньона. Предшественники сверхновых типа II имеют массу, по крайней мере,  $8 M_{\odot}$  и обладают коротким сроком жизни на главной последовательности. В таблице 4.2 приведены несколько ближайших к Солнцу кандидатов в сверхновые [4.8]. Все эти звёзды находятся достаточно далеко от Солнца, чтобы не оказать практически никакого влияния на Землю при их взрывах как сверхновых.

Таблица 4.2. Близкие к Солнцу кандидаты в сверхновые.

Звезда	Созвездие	Расстояние, св. лет	Тип сверхновой	Спектральный класс звезды
ИК Пегаса В	Пегас	150	Ia	DA
$\psi$ Кассиопеи А	Кассиопея	195	II	K0III-IIIb
Спика А ( $\alpha$ Девы)	Дева	250	II	B1III-IV
Бекрукс А+В ( $\beta$ Южного Креста)	Южный Крест	280	II	B0.5III + B2V
$\eta$ Центавра	Центавр	310	II	B1.5Vne
Акрукс А+В ( $\alpha$ Южного Креста)	Южный Крест	320	II	B0.5IV + B1V
47 Тельца А	Телец	330	II	G5III

### 3) Близкие остатки сверхновых.

Ближайшими к Солнцу остатками сверхновых являются Vela Junior (RX J0852.0-4622), образовавшийся примерно 800 лет назад и удаленный на 200 пк, и Vela Supernova Remnant, вспыхнувший 11–12 тыс. лет назад и удаленный на 250 пк, соответственно. Оба этих остатка слишком далеко, чтобы Солнце могло в них попасть.

## 4.4. Близкий гамма-всплеск

### Что такое гамма-всплески.

Первые гамма-всплески были зарегистрированы в 1967 г. с борта американского военного спутника «Vela». Они представляли собой всплески гамма-излучения длительностью от 10 мс до тысяч секунд. Всплески приходили из разных точек неба, вспышки в этих точках ни разу не повторялись. Поток гамма-излучения во

время всплеска существенно превышал фоновые уровни. За время всплеска поток энергии составляет от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$  эрг/см<sup>2</sup>.

В течение нескольких десятилетий не удавалось отождествить источники гамма-всплесков ни с одним астрономическим объектом из-за низкой точности определения положения источников в гамма-диапазоне. Это удалось сделать только в 1997 г., когда гамма-всплеск GRB 970228, зарегистрированный с борта спутника ВерроSAX, через 8 часов был обнаружен этим же спутником в рентгеновском диапазоне, как затухающий источник. Координаты «рентгеновского послесвечения» гамма-всплеска были определены с существенно большей точностью, чем самого всплеска. Затем на источник навелись наземные телескопы, а немного позже — космический телескоп имени Хаббла.

Оказалось, что источники гамма-всплесков находятся в далеких галактиках на космологических расстояниях от Земли. Например, галактика, в которой находился первый отождествленный всплеск GRB 970228, имела красное смещение  $z = 0.7$ . Красное смещение большинства гамма-всплесков лежит в интервале  $z = 0-4$ , для самых далеких достигает 6.

Космологические расстояния до гамма-всплесков указывает на их колоссальную энергетику. Энергия гамма-всплеска GRB 970228 в предположении об изотропности его излучения, составляет  $10^{52}$  эрг (только в гамма-диапазоне). Это на порядок выше энергии взрыва типичной сверхновой. Для некоторых гамма-всплесков энергия достигает  $10^{54}$  эрг.

По длительности среди гамма-всплесков выделяются две хорошо разделённые группы: длинные и короткие всплески. Длительность длинного гамма-всплеска составляет от 2 до 100 с, в редких случаях — до нескольких часов, коротких — от 10 мс до 2 с. Механизмы длинных и коротких гамма-всплесков кардинальным образом различаются.

### Механизм длинных гамма-всплесков.

Длинные гамма-всплески, вероятно, связаны со сверхновыми. Уже у многих гамма-всплесков для отождествленных с ними источниками оптического излучения наблюдались характерные для сверхновых кривые блеска и спектры (спустя 2–3 недели

после самого гамма-всплеска, т. е. в максимуме блеска сверхновой).

Гамма-всплески происходят при вспышках сверхновых типа Ib/Ic, причем далеко не все такие сверхновые могут вызвать гамма-всплеск. Ядро звезды должно сколлапсировать в чёрную дыру. Для этого начальная масса звезды должна быть больше  $25 M_{\odot}$ . Ядро предсверхновой (а возможно вся звезда в целом) должно быстро вращаться и породить вращающуюся чёрную дыру (так называемую Керровскую чёрную дыру). И, наконец, звезда перед вспышкой сверхновой должна лишиться водородной оболочки. Такие звёзды называют звёздами Вольфа-Райе, по сути это гелиевые или углеродно-кислородные ядра нормальных звёзд. Сочетание всех перечисленных факторов встречается достаточно редко, поэтому гамма-всплески порождает только одна сверхновая из 100 или 1000. Соответственно, если коллапсирующие сверхновые вспыхивают в галактике типа Млечного Пути примерно 1 раз в 100 лет, то гамма-всплески в ней происходят раз 10–100 тыс. лет.

Согласно наиболее популярной сегодня модели гамма-всплеска внутренняя часть ядра превращается во вращающуюся чёрную дыру. Внешние части ядра образуют массивный диск вокруг неё. В течение нескольких секунд диск аккрецирует в чёрную дыру. Взаимодействие диска и чёрной дыры выбрасывает небольшую часть вещества вдоль оси вращения в виде узких коллимированных джетов. Вещество в джетах разгоняется до релятивистских скоростей. Джеты пробивают оболочку звезды, процессы в них становятся причиной гамма-всплеска.

Угол раствора джета составляет несколько градусов. Это значение подтверждается наблюдениями собственного излучения джета в рентгеновском и оптическом диапазонах (в то время, когда регистрируется гамма-всплеск). Это означает, что длинные гамма-всплески во Вселенной происходят примерно в 1000 раз чаще (плюс-минус порядок величины), чем наблюдается, но основную их часть мы не видим, так как конусы их излучения проходят мимо нас.

Одновременно полная энергия гамма-всплеска оказывается во столько же раз ниже, чем в случае изотропного излучения.

### Механизм коротких гамма-всплесков.

Длительность коротких гамма-всплесков, особенно самых коротких, не позволяет объяснить их в модели сверхновой с коллапсирующим ядром. Для них была предложена модель слияния двойных нейтронных звёзд. Из-за большого углового момента сливающаяся нейтронная звезда не может сразу и целиком превратиться в чёрную дыру. Из части нейтронной звезды образуется начальная чёрная дыра с аккреционным диском вокруг неё. Взаимодействие диска с чёрной дырой порождает гамма-всплеск. По расчётам на суперкомпьютерах, характерное время таких процессов должно составлять доли секунд, что совпадает с длительностью коротких гамма-всплесков. Этот процесс имеет много сходства с процессами в коллапсирующем ядре сверхновой, порождающей длинные гамма-всплески.

Отождествлённые короткие гамма-всплески лежат в среднем ближе к нам, чем длинные, и характеризуются меньшим выделением энергии, что также служит косвенным подтверждением модели сливающихся нейтронных звёзд.

Долгое время у описанной модели не было прямых подтверждений. Ситуация изменилась несколько лет назад. 17 августа 2017 г. космическими гамма-обсерваториями Ферми и INTEGRAL был зарегистрирован короткий гамма-всплеск GRB 170817A. Одновременно, наземные гравитационно-волновые обсерватории LIGO и Virgo зарегистрировали событие GW170817, которое оказалось всплеском гравитационных волн от сливающихся нейтронных звёзд (все гравитационно-волновые события до этого были слияниями двойных чёрных дыр). Эти события совпадали по времени и по положению на небе.

Из-за малой длительности коротких гамма-всплесков их прямое излучение в других диапазонах, помимо гамма-диапазона, не наблюдалось. Поэтому данных о направленности (коллимации) их излучения нет.

Возможно, короткие гамма-всплески возникают и при слиянии двойной системы состоящей из нейтронной звёзды и чёрной дыры.

### Гамма-всплески в нашей Галактике.

Длинные гамма-всплески в Млечном Пути происходят примерно 1 раз в 100 000 лет. Вероятность того, что за 100 000 лет в конус гамма-излучения попадет Солнце, равна примерно 0.001, соответственно, Солнечная система будет подвергаться облучению излучением гамма-всплеска из нашей Галактики примерно каждые 100 млн лет. За время существования Солнца это происходило около 50 раз, но не все эти события оказывали существенное воздействие на Землю.

### Воздействие близкого гамма-всплески на Землю.

Процитируем оценку из статьи Российского астрофизика Б.Е. Штерна [4.9]: *«Возьмем умеренный случай энерговыделения  $10^{52}$  эрг и расстояние до всплеска 3 парсека, 10 световых лет, или  $10^{19}$  см – в таких пределах от нас находится с десятков звёзд. На таком расстоянии за считанные секунды на каждом квадратном сантиметре попавшейся на пути гамма-квантов планеты выделится  $10^{13}$  эрг. Это эквивалентно взрыву атомной бомбы на каждом гектаре неба! Атмосфера не помогает: хоть энергия высветится в ее верхних слоях, значительная часть мгновенно дойдет до поверхности в виде света. Ясно, что все живое на половине планеты будет истреблено мгновенно, на второй половине чуть позже за счет вторичных эффектов. Даже если мы возьмем в 100 раз большее расстояние (это уже толщина галактического диска и сотни тысяч звёзд), эффект (по атомной бомбе на квадрат со стороной 10 км) будет тяжелейшим ударом, и тут уже надо серьезно оценивать — что выживет и выживет ли вообще что-нибудь.»*

Возьмем уровень энерговыделения  $10^{52}$  эрг, названный Б. Штерном, и количество поглощенной энергии гамма-излучения  $10$  кДж/м<sup>2</sup> (или  $10^7$  эрг/см<sup>2</sup>), которое вызывает серьезное повреждение озонового слоя [4.4]. Эти значения позволяют найти расстояние, с которого гамма-всплеск может нанести ущерб Земле – примерно 3 кпк. Учитывая, что массивные звёзды, порождающие гамма-всплески, находятся в диске Галактики, а расстояние до её центра составляет 8.5 кпк, получаем, что такими будут примерно 10% гамма-всплесков. За время существования Земля подверга-

лась такому облучения примерно 5 раз.

Практически полное разрушение озонового слоя происходит при поглощении  $10^9$  эрг/см<sup>2</sup> энергии [4.5]. Для этого гамма-всплеск должен произойти на расстоянии не более 300 пк. Такое событие происходит один раз в 10 млрд лет, т. е. за время жизни Солнца. Возможно это событие уже было и вызвало одно из вымираний, возможно его еще не было, но оно случится за оставшееся время жизни Солнца, а возможно оно вообще не успеет случиться потому, что «один – это не статистика».

С расстояний, на которых гамма-излучение всплеска начинает оказывать заметный эффект, влиянием космических лучей от породившей его сверхновой можно пренебречь.

Если энергия квантов гамма-излучения превышает 10 МэВ (это наблюдается у многих гамма-всплесков), то они будут порождать в атмосфере Земли радиоактивные изотопы некоторых элементов. В первую очередь речь идет об изотопе углерода <sup>14</sup>C, с периодом полураспада 5700 лет. Содержащийся в природе изотоп <sup>14</sup>C в основном генерируется космическими лучами. Выход <sup>14</sup>C от гамма-лучей с энергией выше 10 МэВ составляет около  $10^3$  атомов на эрг. Всплеск ближе 1 кпк за 10 с произведет столько <sup>14</sup>C, сколько космические лучи за 1000 лет. Такое количество не несет серьезной опасности для биосферы Земли. Короткий период полураспада не позволит обнаружить избыток <sup>14</sup>C в Земных отложениях.

Воздействие близких гамма-всплесков на Землю можно пытаться обнаружить по изотопу <sup>10</sup>Be с периодом полураспада 10-15 млн лет. Этот изотоп образуется при расщеплении ядер атомов O и N энергичными гамма-квантами. Генерация этого изотопа также не несет серьезной угрозы биосфере Земли.

#### **4.5. Попадание Солнца в плотное облако межзвёздного газа**

Пространство между звёздами в нашей Галактике заполнено межзвёздной средой, которая состоит из разреженного вещества (газа и пыли). Межзвёздный газ обычно составляет не менее 90% массы межзвёздной среды. Характерная плотность межзвёздного вещества – 1 атом/см<sup>3</sup>, но из-за большого объема Галактики пол-

ная масса межзвёздного вещества в ней достигает миллиардов масс Солнца. В спиральных галактиках, к которым относится и Млечный Путь, масса межзвёздной среды составляет около 5% от массы галактики (массы звёзд галактики). Химический состав межзвёздной среды таков, что на 1000 атомов водорода приходится около 100 атомов гелия и 2–3 атома более тяжелых элементов. При этом значительная часть тяжелых элементов входит в состав межзвёздной пыли.

Межзвёздная среда состоит из соседствующих фракций (фаз), различающихся по температуре и плотности. Эти фракции находятся в приблизительном динамическом равновесии, т. е. давления в них примерно равны. Соответственно, горячие фракции будут менее плотными, чем холодные.

Примерно половину (по объёму) межзвёздной среды представляет собой очень горячий и разреженный корональный газ. Его температура  $T \sim 10^5$  К и более и концентрация (астрофизики часто применяют термин «плотность», хотя корректнее именно «концентрация»)  $n \sim 0.003$  см<sup>-3</sup>. Корональный газ образует каверны в газовом диске Галактики. Он порождается взрывами сверхновых звёзд. Из-за высокой температуры и низкой концентрации он очень медленно остывает. Почти такую же долю объема занимают области ионизованного водорода (области HII) с  $T \sim 10^4$  К и  $n \sim 0.1$  см<sup>-3</sup>. Вместе корональный газ и HII занимают 90% объема диска Галактики. Далее идут области нейтрального водорода HI. Они делятся на теплые области HI с температурой  $T \sim 10^3$  К и концентрацией и  $n \sim 1$  см<sup>-3</sup> и более холодные облака HI с  $T = 80\text{--}100$  К и  $n \sim 10$  см<sup>-3</sup>. Эти две фракции занимают примерно по 1% объема диска. Далее идут облака и гигантские облака молекулярного водорода H<sub>2</sub>, в которых  $T = 10\text{--}30$  К и  $n \sim 10^2\text{--}10^3$  см<sup>-3</sup>. Внутри облаков встречаются так называемые молекулярные ядра с  $T = 10$  К и  $n \sim 10^4\text{--}10^6$  см<sup>-3</sup>. Большая часть молекулярного газа содержится в молекулярном кольце между 3.5 и 7.5 кпк от центра Галактики (Солнце находится в 8.5 кпк от центра). Вблизи Солнца гигантские молекулярные облака находятся за пределами так называемого пояса Гулда, т. е. не ближе 250 пк от Солнца.

При движении вокруг центра Галактики Солнечная система



может попадать в такие плотные молекулярные облака. Молекулы водорода из облака при определённых обстоятельствах могут достигнуть атмосферы Земли и вступить в химическую реакцию с кислородом. Химия верхних слоев атмосферы может стать совершенно иной, недружественной человеку. Вопрос пока ещё плохо исследован. Надо выяснить какой поток молекулярного водорода будет достигать атмосферы Земли. Здесь очень важным является взаимодействие вещества облака с солнечным ветром, который имеет низкую плотность ( $n \sim 1 \text{ см}^{-3}$ ) на орбите Земли, но высокую скорость (300–700 км/с). Он не пропускает к Земле заряженные частицы низких энергий, но нейтральные атомы и молекулы могут её достигать.

Казалось бы, химическая реакция водорода с кислородом дает воду, которая безопасна для человека. Однако промежуточные продукты в этих реакциях, в особенности радикалы, могут быть не столь безопасны. В любом случае до ближайшего молекулярного облака Солнцу лететь не менее 1 млн лет, в этот период времени такой вид астрофизической опасности себя не проявит. Вероятно, у нас хватит времени, чтобы разобраться с этой проблемой.

#### 4.6. Экзотика

Приведём один пример экзотической астрофизической опасности – фазовый переход вакуума во Вселенной.

Бозон Хиггса и связанное с ним скалярное поле – необходимый элемент Стандартной модели элементарных частиц. В рамках этой модели такое поле отвечает за массу покоя таких элементарных частиц как бозоны. Также поле Хиггса определяет энергию физического вакуума. Существует несколько вариантов теории, описывающей Хиггсовские поля.

Описываемая ситуация возможна, если поле Хиггса действительное, т. е. его потенциал зависит от одной переменной.

Форма потенциала этого поля напоминает букву W – у него два минимума с максимумом между ними, а при больших положительных или отрицательных значениях поля потенциал стремится

к бесконечности. Вакуумное состояние соответствует полю в минимуме потенциала.

В наиболее простом варианте теории глубины двух минимумов потенциала одинаковы. Но есть варианты теории, в которых глубины минимумов различаются, как на рисунке 4.10. Более глубокий минимум соответствует т. н. истинному вакууму, второй – ложному.



Рис. 4.10. Потенциал Хиггсовского поля с истинным и ложным вакуумами.

Во всей нашей Вселенной вакуум в одинаковом состоянии, но мы не знаем ложный он или истинный. Если истинный, то это состояние устойчиво, и нашей Вселенной ничего не грозит. Если же нас окружает ложный вакуум, то это состояние метастабильно, и возможен фазовый переход к устойчивому истинному вакууму. Причин перехода может быть несколько. Во-первых, спонтанный квантовый туннельный переход. Он показан на рисунке 4.10. Однако если центральный максимум достаточно высок, туннельный переход будет подавлен, т. е. его вероятность будет низка, а характерное время реализации перехода может намного превышать возраст Вселенной.

Другой вариант такой. Если в небольшой области пространства поднять энергию поля (разогреть) выше центрального максимума потенциала, то после «остывания» этой области она может перейти в состояние истинного вакуума и вокруг нее начнется фазовый переход. Локальный разогрев вакуума может произвести

столкновение двух частиц очень высоких энергий. Эти частицы могут быть разогнаны на ускорителе или возникнуть в космосе. Фазовый переход вакуума был одной из причин протестов против запуска Большого адронного коллайдера.

Время ожидания фазового перехода вакуума, вызванного космическими лучами, гораздо короче, чем временная шкала туннельного перехода.

При фазовом переходе вакуума выделится энергия, которой, вероятно, хватит чтобы разрушить все окружающие нас структуры Вселенной на разных масштабах. Волна фазового перехода будет двигаться в пространстве со скоростью света, мы не сможем её заметить и погибнем мгновенно и безболезненно.

Способ защиты от этой опасности неизвестен. Однако, пока непонятно, возможно ли это в принципе. Два аргумента, почему не стоит особенно бояться этого вида астрофизической опасности. Во-первых, если бы мы находились в ложном вакууме, его переход скорее всего уже случился бы из-за космических лучей сверхвысоких энергий, которые на порядки превосходят всё, что достигается сегодня на ускорителях.

Во-вторых, в самом популярном варианте Стандартной теории потенциал Хиггсовского поля комплексный, т. е. является функцией двух переменных. Профиль потенциала похож на доннышко бутылки шампанского (см. Рис. 4.11).

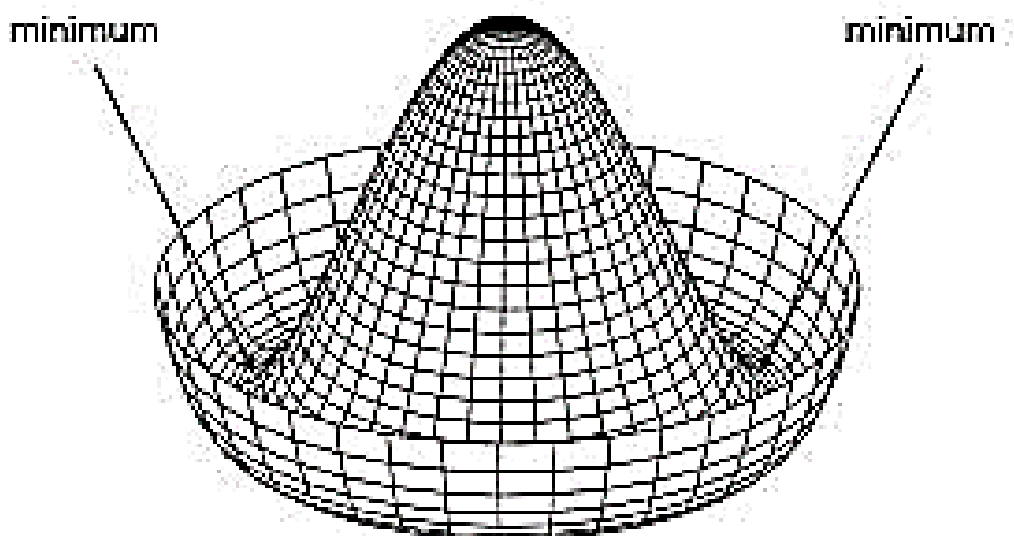


Рис. 4.11. Комплексный потенциал Хиггсовского поля.

Даже если это «донышко» наклонено, то возможно движение вокруг центрального максимума к точке минимума потенциала. В этом варианте фазовый переход метастабильного вакуума, описанный выше, невозможен в принципе.

### *Литература к разделу*

- 4.1 Randall L., Reece M. Dark Matter as a Trigger for Periodic Comet Impacts // Physical Review Letters, 2014. V. 112, Iss. 16, id 161301; <http://arxiv.org/abs/1403.0576>. 2014.
- 4.2 Рэндалл Л. Темная материя и динозавры: Удивительная взаимосвязь событий во Вселенной // М.: Альпина нон-фикшн, 2017. 506 с.
- 4.3 Melott, A.L., Thomas, B.C., Kachelrieß, M., et al.: A Supernova at 50 Pc: Effects on the Earth's Atmosphere and Biota. Astrophysical Journal 840, 105 (9pp), 2017
- 4.4 Thomas, B.C., Melott, A.L., Jackman, et al. Gamma-ray bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic, and Biogeochemical Effects. Astrophysical Journal 634, 509-533, 2005.
- 4.5 Thomas, B.C., Yelland, A.M. Terrestrial Effects of Nearby Supernovae: Updated Modeling. Astrophysical Journal, 950:41 (9pp), 2023.
- 4.6 Салагаева А.В., Хлебопрос Р.Г. Влияние вторичных нейтронов космических лучей на тропосферу и биосферу Земли: эколого-экономический аспект. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 88 с.
- 4.7 Еськов К.Ю. Удивительная палеонтология: история Земли и жизни на ней. – М.: ЭНАС, 2008. – 312 с.
- 4.8 Список звёзд — кандидатов в сверхновые // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 14.08.2023).
- 4.9 Штерн Б.Е. Гамма-всплески: секундные катастрофы галактического масштаба. Scientific.ru, 2002. URL: <http://www.scientific.ru/journal/burst2.html> (дата обращения 14.08.2023).
- 4.10 Борисов Г. В., Шустов Б. М. Открытие первой межзвёздной кометы и пространственная плотность межзвездных объектов в Солнечной окрестности // Астрономический Вестник. том 55, № 2, с. 1–9, 2021.

## **Часть II. АНТРОПОГЕННЫЕ ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ**

## 5. КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

Проблема космического мусора (КМ) рассматривается как основной (в настоящее время) вид космической опасности. Этой проблеме посвящается большое количество профессиональных публикаций, в том числе обзоров (см., например, [5.1–5.4]). Что касается направлений исследований по тематике КМ, то важнейшая фундаментальная задача – это глубокое изучение факторов и процессов, составляющих суть проблемы, и её значения для устойчивого развития человечества, а важнейшая задача прикладной науки – своевременное выявление угроз, связанных с КМ, надёжная оценка рисков, и разработка методов противодействия им.

### 5.1. Общие сведения о космическом мусоре

Под космическим мусором обычно подразумевают (см., например, [https://ru.wikipedia.org/wiki/Космический\\_мусор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Космический_мусор)) все неиспользуемые искусственные объекты в околоземном космическом пространстве. К ним относятся вышедшие из строя спутники, отработанные ступени ракет, а также фрагменты от их распада и столкновений. Все эти объекты являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты (КА). Это определение космического мусора вполне рабочее и устоявшееся, но здесь правильнее использовать более точный термин «техногенный космический мусор». Ведь в околоземном космическом пространстве (ОКП) постоянно присутствует и естественный космический мусор, который также представляет определённую опасность для работающих КА. Собственно, обозначающий космический мусор английский термин *debris* был введён и до сих пор используется в исследованиях структуры и эволюции населения малых тел Солнечной системы, в которых термин *debris disk* означает околозвёздный диск, состоящий из пыли и более крупных фраг-

ментов – «строительного мусора», оставшегося от стадии формирования планетной системы. Эту естественную составляющую (природный космический мусор) всегда нужно учитывать. В дальнейшем под термином космический мусор мы будем, как правило, понимать техногенный КМ, но уделим специальное внимание и естественной составляющей.

#### 5.1.1. Источники и классификация КМ

Источников КМ немало:

- рост количества КА (часть которых неизбежно превратится в космический мусор);
- появление в космосе объектов, отбрасываемых при запуске, и при различных экспериментах в космосе;
- разрушения КА из-за внутренних причин, а также намеренные разрушения для демонстрации военных технологий. Эта причина – одна из наиболее существенных. Российская система контроля космического пространства (СККП) обнаружила восемь случаев разрушения космических аппаратов на орбите Земли только в 2018 году;
- столкновения, рост частоты которых обусловлен как ростом количества КА, так и естественной эволюцией населения КМ;
- микроостатки при сгорании топлива;
- естественные источники (микрометеороиды, метеороиды).

И все эти источники (за исключением последнего) имеют тенденцию к росту. Т. е. уровень рисков, связанных с этой космической опасностью, растет.

Техногенный космический мусор, мешающий космической деятельности, образовывался, образуется и будет образовываться в результате космической деятельности. Это своеобразное проявление принципа Ле Шателье-Брауна, применимого к равновесию любой природы: механическому, тепловому, химическому, электрическому и даже, как мы видим на примере проблемы космического мусора, к социально-технологическому. Главная опасность, исходящая от нарастающего количества космического мусора техногенного происхождения, – это угроза столкновений с рабочими

КА, приводящих к выводу КА из строя и, в перспективе, к прекращению самой космической деятельности.

Для представления об обстановке в ОКП приведем несколько статистических сведений (по данным Европейского космического агентства, ESA, см. <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>) по состоянию на 15 августа 2024 г.:

- количество космических аппаратов в ОКП – 13030 (из них действующих 10100);
- число регулярно отслеживаемых объектов – 36080;
- число разрушений на орбите, взрывов, столкновений или событий невыясненной природы, приведших к фрагментации КА в период от начала космической эпохи – более 650.

В табл. 5.1 приведена широко принятая классификация объектов КМ по размеру, приведена оценка количества объектов КМ в каждом классе размеров, отмечены возможные последствия столкновений и существующие методы защиты рабочих КА.

Таблица 5.1. Классификация объектов космического мусора по размерам, последствия и меры защиты.

Класс объектов КМ по размеру	I 0.1–1 см	II 1–10 см	III более 10 см
Количество объектов на всех высотах	130 млн	1100 тыс.	40500
Последствия	серьёзное повреждение КА	весьма вероятно уничтожение КА	гарантированное уничтожение КА
Существующие методы защиты	применение защитных экранов	манёвр уклонения	манёвр уклонения

Как видно из табл. 5.1, количество объектов, потенциально способных вывести из строя работающий автоматический КА или пилотируемый корабль, достигает многих сотен тысяч, а объектов, могущих нанести космическому аппарату заметный ущерб, в сотни раз больше. Отслеживается с достаточной полнотой лишь самая крупная фракция КМ. В табл. 5.2 (адаптировано из [5.5]) приведены механизмы образования объектов КМ различного размера.



Таблица 5.2. Классификация КМ по размеру и механизмы его образования.

Наименование	Происхождение	Размеры частиц
Элементы конструкций	Выведение на орбиту и технологические операции на орбите (раскрытие антенн, солнечных батарей и др.). Последние ступени ракет носителей, разгонные блоки, отбрасываемые элементы конструкций, при раскрытии солнечных батарей и антенн, иглы Уэстфорда, запущенные США в начале шестидесятых годов и др.	10 см – 10 м  0.5 мм – 4 мм (иглы Уэстфорда)
Фрагменты	Фрагменты, образовавшиеся в результате взрывов и столкновений.	0.1 мм – 10 м
Капли жидкости	Капли жидкостей, вытекающие из поврежденных емкостей и радиаторов.	2 мм – 4 см
Частицы шлака	Крупные частицы, выделяющиеся во время окончания работы твердотопливных двигателей.	0.1 мм – 3 см
Частицы пыли	Мелкие частицы, выделяющиеся во время работы твердотопливных ракетных двигателей.	1 мкм – 80 мкм
Чешуйки краски	Образуются в результате деградации поверхности КА.	2 мкм – 0.2 мм
Экстракция	Выбросы материала, образующиеся в результате ударов микрометеоритов и частиц космического мусора о корпус КА.	1 мкм – 5 мм

### 5.1.2. Населенность околоземного космического пространства объектами КМ

Динамика изменения количества объектов в ОКП показана на рис. 5.1 (по данным ESA).

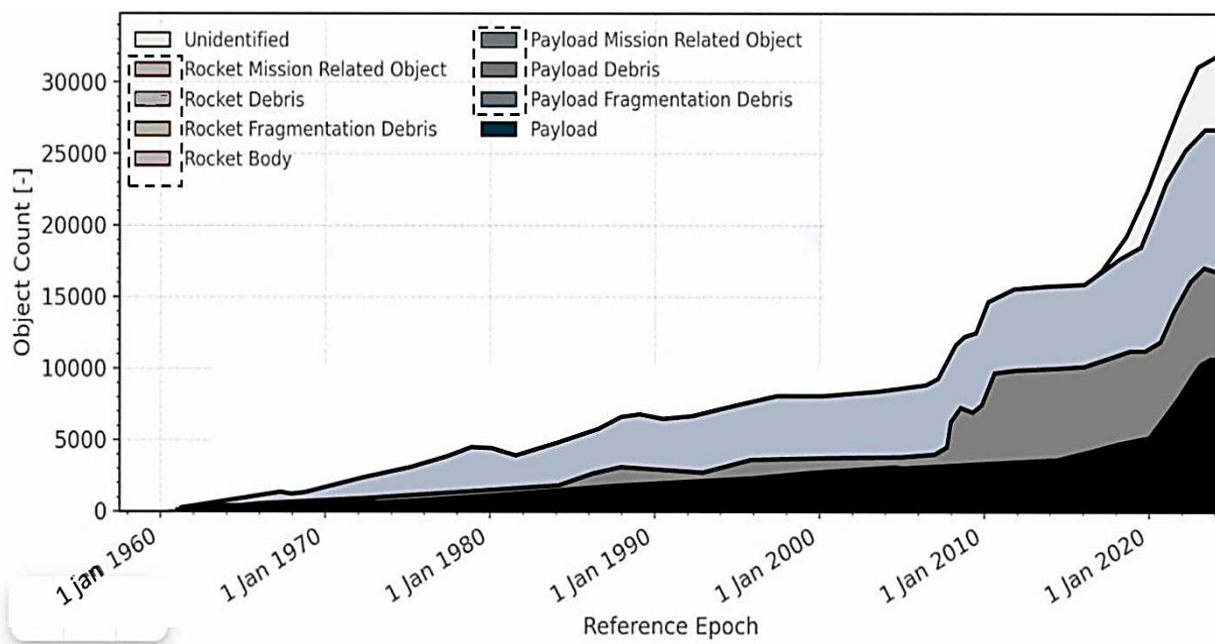


Рис. 5.1. Динамика изменения количества объектов в ОКП. На легенде тонким выделены объекты различных типов (см. пояснения в тексте).

Объекты в ОКП можно разделить на две широкие категории: те, движение которых можно проследить (назад) до события запуска и природу которых можно определить, и те, для которых это пока невозможно. Последние на рисунке обозначены как неопознанные (*unidentified*). Объекты первого типа классифицированы следующим образом:

- полезная нагрузка (*Payloads*) – космический объект, предназначенный для выполнения определенной функции в космосе;
- объекты, имеющие отношение к полезной нагрузке (*Payload mission related objects*) – это космические объекты, выброшенные в виде космического мусора, которые выполняли определенную функцию полезной нагрузки. Распространёнными примерами являются крышки оптических приборов или потерянные инструменты астронавтов;
- фрагменты КМ, произведенные разрушением полезной нагрузки или непреднамеренно высвобожденные из полезной нагрузки в виде космического мусора, происхождение которых можно проследить до события отделения от полезной нагрузки (*Payload fragmentation debris*). Этот класс включает объекты, созданные при взрыве полезной нагрузки или при её

- столкновении с другим объектом;
- объекты, созданные при взрыве полезной нагрузки или при ее столкновении с другим объектом;
  - фрагменты КМ, ассоциируемые с полезной нагрузкой. (*Payload debris*) – примерно то же что и в предыдущем пункте, но уверенно проследить их происхождение от данной полезной нагрузки не удастся, хотя орбитальные или физические свойства позволяют установить корреляцию с источником;
  - ступень ракеты-носителя (*Rocket body*) – космический объект, предназначенный для выполнения функций, связанных с запуском; сюда входят различные орбитальные ступени ракет-носителей, но не полезные нагрузки;
  - объекты КМ, связанные с полетом ракеты-носителя (*Rocket mission related objects*), сбрасываемые при выводе на орбиту;
  - фрагменты КМ, образующиеся при взрыве ракеты (*Rocket fragmentation debris*), ассоциация которых с конкретной ракетой-носителем выявлена;
  - то же, что и в предыдущем пункте, но ассоциировать их с конкретной ракетой не удастся. Обломки ракет (*Rocket debris*).
  - рисунок 5.1 иллюстрирует тот очевидный факт, что в последние годы наблюдается бурный рост количества КА (на рисунке – кривая payload) и объектов КМ на орбитах в ОКП. Интересно, что число неидентифицированных объектов также быстро растет.

Основной причиной образования фрагментов КМ является фрагментация вследствие внутренних или внешних воздействий. На рис. 5.2, адаптированном как и рис. 5.1 из того же источника (сайта ESA), показана динамика событий фрагментации в ОКП. Из рис. 5.2 следует, что события фрагментации КА совсем нередки и измеряются десятками в год.

Общее количество отслеживаемых объектов в ОКП, большинство из которых является космическим мусором, постоянно растёт. Орбитальные параметры крупных тел (размером более 10–30 см) регулярно определяются системой контроля космического

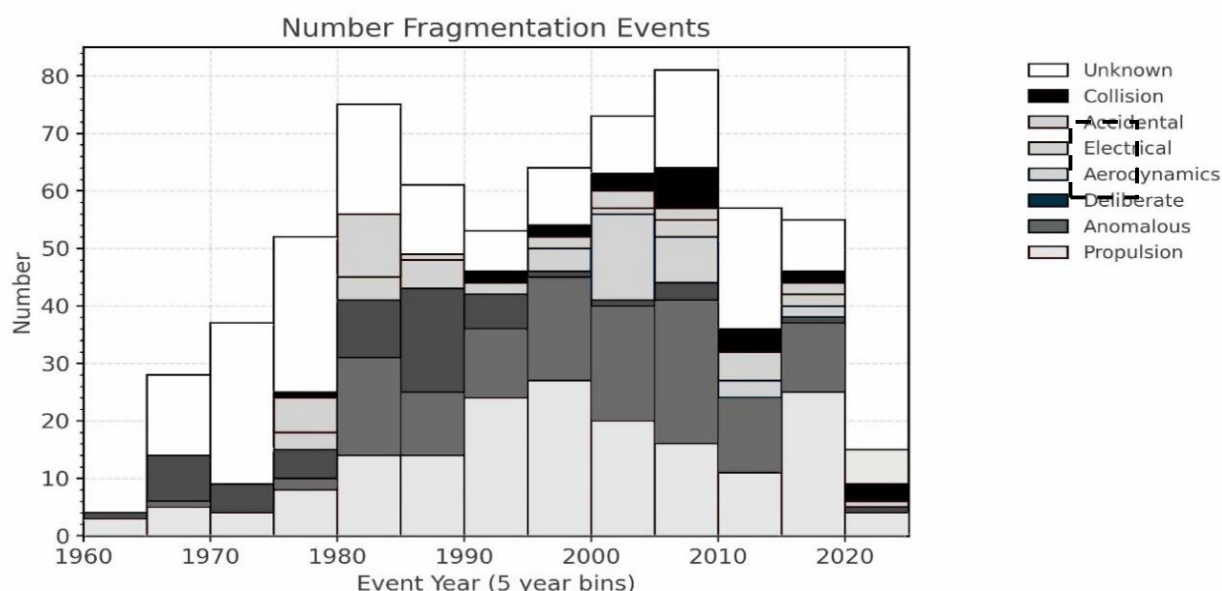


Рис. 5.2. Динамика событий фрагментации в ОКП. На легенде тоном выделены различные причины и факторы фрагментации: неустановленные; столкновения; блок причин: аварии, электротехнические, аэродинамические; преднамеренные; аномальные; связанные с двигательными установками.

пространства (СККП) и средствами Роскосмоса в России и системой контроля космоса (Space Surveillance System) в США. Поддерживаемые ими каталоги содержат текущие орбитальные характеристики каталогизированных объектов, которые позволяют прогнозировать их движение. Полнота каталогов зависит в основном от размера объектов и высоты орбитальной области: на геостационарной орбите возможно проводить с достаточной полнотой мониторинг объектов крупнее 30 см, на низких орбитах полнота достигается и для более мелких объектов. Подробное описание истории, структуры и принципов ведения каталогов можно найти в [5.2]. Здесь мы опишем лишь общепринятое в международной практике представление данных об объекте в каталоге. Этот стандарт, введенный в системе NORAD (США), называется TLE (two-line element). Это двухстрочный формат данных, представляющий собой набор элементов орбиты спутника Земли (объекты КМ – тоже спутники!). Может присутствовать еще одна (необязательная) строка с названием объекта. В табл. 5.3 приведено содержание двух основных строк. В источнике ([https://en.wikipedia.org/wiki/Two-line\\_element\\_set](https://en.wikipedia.org/wiki/Two-line_element_set)) в качестве при-

мера взят ИСЗ «Заря». Данные TLE публикуются для каждого объекта. Кроме того, данные TLE постепенно обновляются, т. к. орбита каждого объекта со временем (довольно быстро) изменяется. Как правило, данные по орбитам объектов обновляются и публикуются ежедневно на сайте Space-Track.org.

Таблица 5.3. Информация в двустрочном формате TLE

Заголовок (не обязательный)

ISS (ZARYA)

Строка 1

Поле	Колонки	Содержание	Пример
1	01	Номер строки	1
2	03–07	Номер объекта в каталоге	25544
3	08	Классификация объекта (U: неклассифицированный, C: классифицированный, S: секретный)	U
4	10–11	Международное обозначение (последние две цифры года запуска)	98
5	12–14	Международное обозначение (номер запуска в году)	067
6	15–17	Международное обозначение (элемент запуска)	A
7	19–20	Время (последние две цифры года)	08
8	21–32	Время (день года и дробная часть дня)	264.51782528
9	34–43	Первая производная среднего движения по времени (баллистический коэффициент)	-.00002182
10	45–52	Вторая производная среднего движения по времени (десятичная точка предполагается)	00000-0
11	54–61	В*, коэффициент давления излучения (десятичная точка предполагается)	-11606-4
12	63–63	Тип эфемерид (всегда нулевой; используется только в нераспределённых данных TLE)	0

13	65–68	Номер набора элементов. Увеличивается при создании нового TLE для этого объекта	292
14	69	Контрольная сумма (по модулю 10)	7

## Строка 2

Поле	Колонки	Содержание	Пример
1	01	Номер строки	2
2	03–07	Номер объекта в каталоге	25544
3	09–16	Наклонение (градусы)	51.6416
4	18–25	Прямое восхождение восходящего узла (градусы)	247.4627
5	27–33	Эксцентриситет (десятичная точка предполагается)	0006703
6	35–42	Аргумент перигея (градусы)	130.5360
7	44–51	Средняя аномалия (градусы)	325.0288
8	53–63	Среднее движение (витков в сутки)	15.72125391
9	64–68	Номер витка (число витков)	56353
10	69	Контрольная сумма (по модулю 10)	7

Отметим, что смысл некоторых элементов TLE, описанный в [5.3], не совсем совпадает с приведенным в табл. 5.3. Вообще пользоваться TLE нужно с пониманием того, что это формат настроен на их использование в т. н. упрощенных моделях возмущений (например, SGP4), поэтому любой алгоритм, использующий TLE в качестве источника данных, должен реализовывать одну из моделей SGP для корректного вычисления состояния объекта в интересующий момент времени. TLE применимы только для объектов, обращающихся вокруг Земли. TLE широко используются в качестве исходных данных для расчета будущих орбит космического мусора, в целях прогноза возможных столкновений, для поддержки анализа рисков, анализа сближений, обеспечения маневрирования во избежание столкновений.

На рис. 5.3 (адаптирован как и последующие рисунки 5.4–5.7 из относительно недавнего (февраль 2023 г.) доклада NASA в ООН [https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2023/TPs/wednesday-8feb-am/Item\\_7\\_-\\_USA.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2023/TPs/wednesday-8feb-am/Item_7_-_USA.pdf)) хорошо видны скачки, соответствующие значимым событиям (разрушениям) в ОКП.

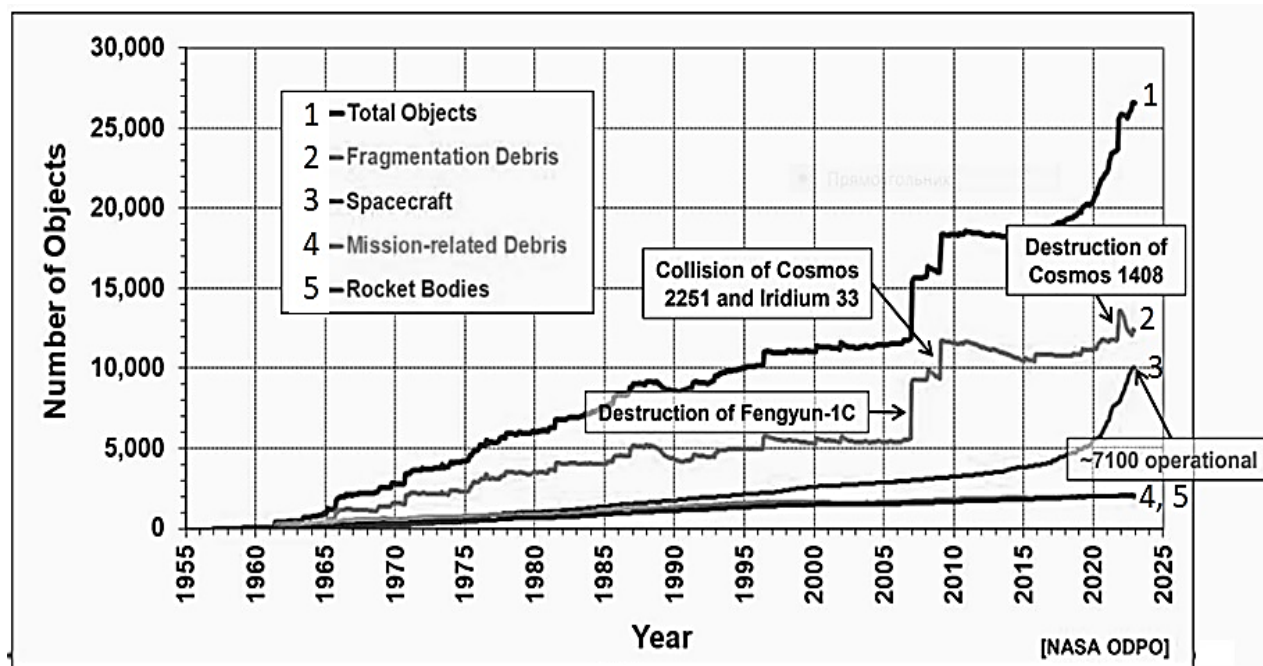


Рис. 5.3. Динамика количества отслеживаемых (каталогизированных) объектов в ОКП. Общее количество (Total) складывается из количества действующих КА (на момент доклада в ООН – 7100), числа ступеней ракет-носителей, фрагментов КМ, образовавшихся вследствие разрушений (Fragmentation debris) и в процессе запусков.

К сожалению, на этой известной диаграмме выделены лишь события разрушений, относящихся к КА России и Китая. Конечно, эта избирательность – элемент политики. Чтобы «восстановить справедливость», отметим несколько событий в 2018–2019 гг., приведших к увеличению населения КМ, к которым Россия не имеет отношения (данные предоставлены в основном В.М. Агаповым):

- 28 февраля 2018 г. Разрушение на геостационарной орбите верхней ступени *Transtage* американской РН *Titan III*С (почти 50 лет спустя после запуска этой ракеты в 1969 г!). Обнаружены 183 новых фрагментов космического мусора;



- 30 августа 2018 г. произошла фрагментация второй ступени на американской РН Atlas V Centaur массой 2243 кг, длиной 1268 см, диаметром 305 м. Обнаружен 581 фрагмент. Это увеличило количество каталогизированного космического мусора на высокоэллиптической орбите на 25%!
- апреля 2019 г. взорвалась 2-ая ступень РН Atlas V, обнаружены десятки осколков;
- 10 апреля 2019 г. компания Intelsat сообщила о повреждении в двигательной установке спутника Intelsat 29e, которое вызвало утечку топлива и возможно частичное разрушение ИСЗ. Аномалия произошла 7 апреля 2019 г. Связь со спутником прервалась;
- 27 марта 2019 г. Индия сбила свой 700-килограммовый спутник, образовался большой рой обломков.

Надо сказать, что информация о «мусорном вкладе» космических держав сильно разнится в разных источниках. В одних отчетах первое место занимает Китай, в других – Россия, в третьих – США. При этом тройка лидеров остается одной и той же. По данным публикуемого NASA бюллетеня *Orbital Debris Quarterly News* (Volume 28, Issue 3, July 2024), по состоянию на 4 июня 2024 г. наибольшее количество известных объектов “космического мусора” числится за США – 13094. На втором месте Россия – 7020, на третьем Китай – 4965. Далее Великобритания – 698, Франция – 622, Япония – 316, Индия – 207 и Европейское космическое агентство – 125.

Можно отметить также незначительные спады численности КМ, видимые на рис. 5.3. Они обусловлены тем, что на низких орбитах работает механизм самоочищения, то есть объекты сходят с таких орбит в нижние слои атмосферы, где разрушаются (сгорают). На самых низких орбитах высотой 200 км время схода измеряется днями. Но уже на орбитах высотой около 400 км время схода с орбиты крупных объектов составляет несколько лет, а на высотах 800 и более километров КА может находиться десятки-сотни лет. Так что уж очень надеяться на механизм самоочищения в ОКП не стоит. К тому же в ближайшем будущем ожидается резкий рост запусков коммуникационных «созвездий» КА (SpaceX,



OneWeb, Samsung, Boeing, СФЕРА и т.д., см. подробнее в главе 8), с общим количеством вновь запускаемых КА в десятки тысяч, и ситуация с нарастанием количества опасных объектов КМ станет ещё более серьёзной.

На рис. 5.3 видна только часть общей картины, ведь уверенно отслеживаются только самые крупные объекты космического мусора. При этом проводится мониторинг не всего ОКП, а основное внимание уделяется наиболее засорённым орбитам, которые чаще всего используются для работы космических аппаратов. Это области низких орбит, геостационарной орбиты (точнее геосинхронных орбит) и область средневысоких орбит навигационных ИСЗ. На рис. 5.4 показано распределение отслеживаемых (каталогизированных) объектов в ОКП. Хорошо видно, что наибольшая концентрация отслеживаемых объектов отмечается в указанных областях. Наиболее заселены низкие околоземные орбиты (высота до 2000 км). Динамика заселения этих орбит новыми космическими аппаратами очень быстро нарастает. На рис. 5.5 это хорошо видно.

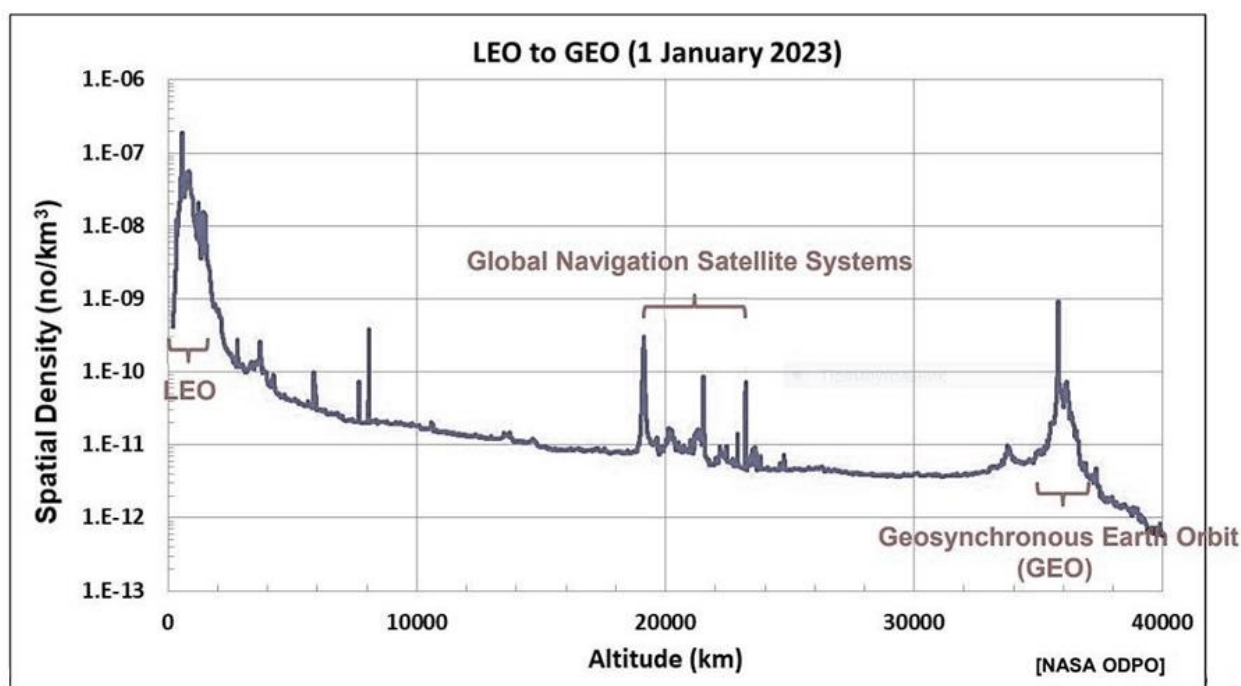


Рис. 5.4. Распределение отслеживаемых (каталогизированных) объектов в ОКП. Сгущения отмечаются в зоне низких орбит (LEO), геосинхронных орбит и особенно геостационарных орбит (GEO), а также в зоне средневысоких орбит (навигационных ИСЗ).

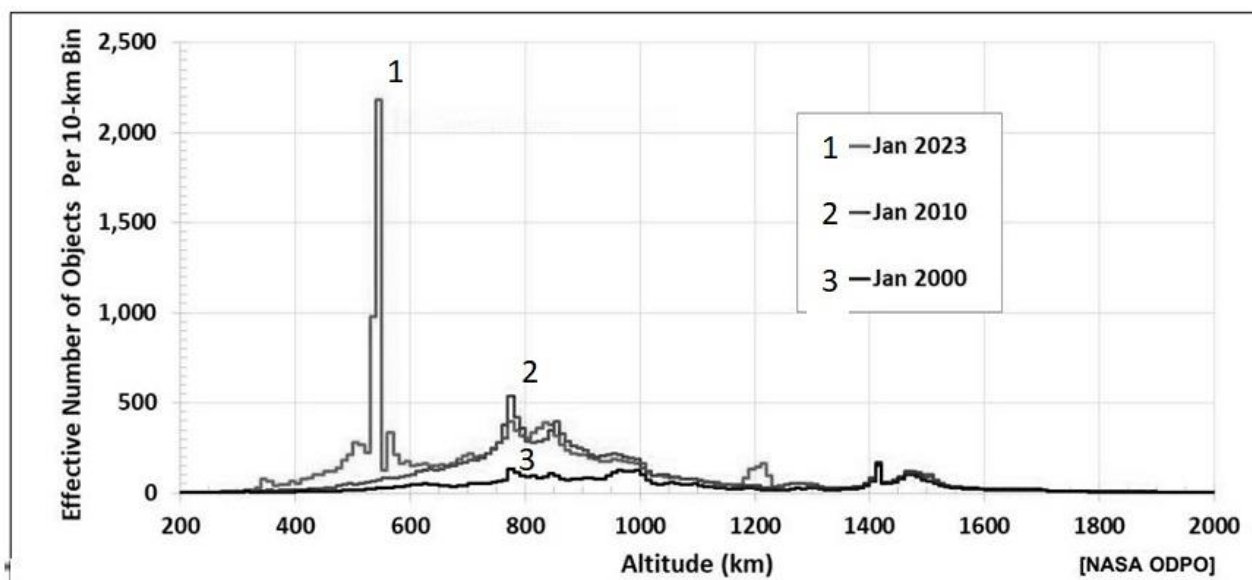


Рис. 5.5. Динамика заселенности области низких орбит в ОКП.

Растёт не только число, но и общая масса объектов в ОКП, включая КМ. На рис. 5.6 показано, как нарастала эта масса с начала космической эпохи. Характерен резкий рост в самые последние годы.

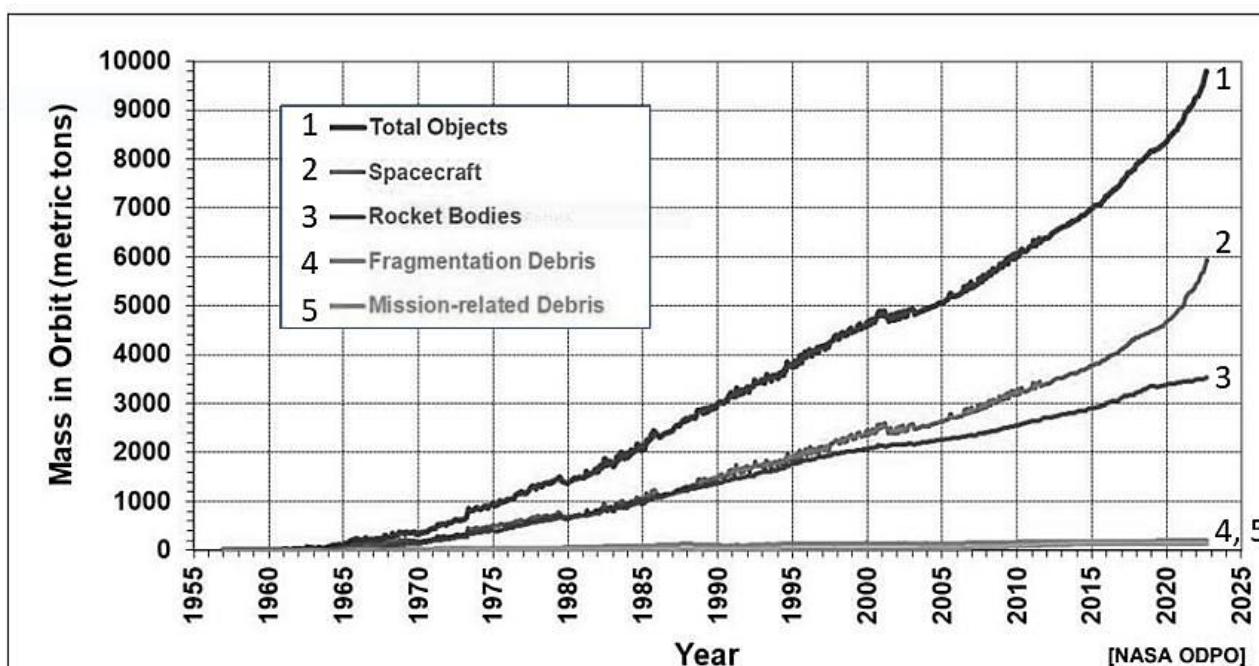


Рис. 5.6. Нарастание со временем массы объектов в ОКП. Обозначения аналогичны обозначениям на рис. 5.3.

Отметим, что, хотя общая масса мелких объектов КМ (фрагментов более крупных тел) составляет лишь небольшую долю общей

массы, их число велико и именно они несут наибольшую опасность столкновения. Знать оценку массы объектов техногенного КМ полезно для того, чтобы сравнить с массой естественной составляющей КМ, о которой уже упоминалось, хотя для оценки степени опасности КМ нужно сравнивать не массы, а потоки частиц техногенного и естественного КМ. Для оценки потоков нужно учитывать не только массы частиц, но и распределение частиц по размеру (массе) и скорости и, конечно, специфику пространственного распределения частиц.

Как было продемонстрировано на рис. 5.4, распределение техногенных объектов в ОКП весьма неоднородно, а вот причин для столь же неоднородного распределения частиц естественного происхождения нет. Считается, что на низких орбитах, а также в других областях концентрации КА (например, в показанных на рис. 5.4 областях средневысоких и геосинхронных орбит), поток частиц техногенного космического мусора превышает природную составляющую. Но в других областях ОКП может превалировать поток объектов естественного происхождения (метеороидов, микрометеороидов). Т. е. соотношение потоков техногенного и естественного мусора зависит от области рассмотрения.

В целом, представление о зависимости числа объектов естественного происхождения от их размера (массы) в ближнем космосе даёт диаграмма на рис. 5.7, адаптированная из [5.6].

На этом рисунке показана сводная статистика кумулятивного числа столкновений объектов естественного космического мусора с Землёй (за год), построенная по большому количеству наблюдений с использованием наиболее известных моделей (см. ссылки в легенде на этом рисунке). Кумулятивное число означает количество столкновений для всех объектов больше заданного размера (массы). Из этой диаграммы можно сделать заключение, что частота столкновений КА сечением  $10 \text{ м}^2$  с частицами естественного происхождения размером более 1 мм составляет в среднем раз в 4 года.

На рис. 5.8 показан темп образования кратеров (кругообразных повреждений) диаметром  $D_{co}$  на солнечных панелях Телескопа им. Хаббла, снятых во время сервисной миссии SM-3 (по

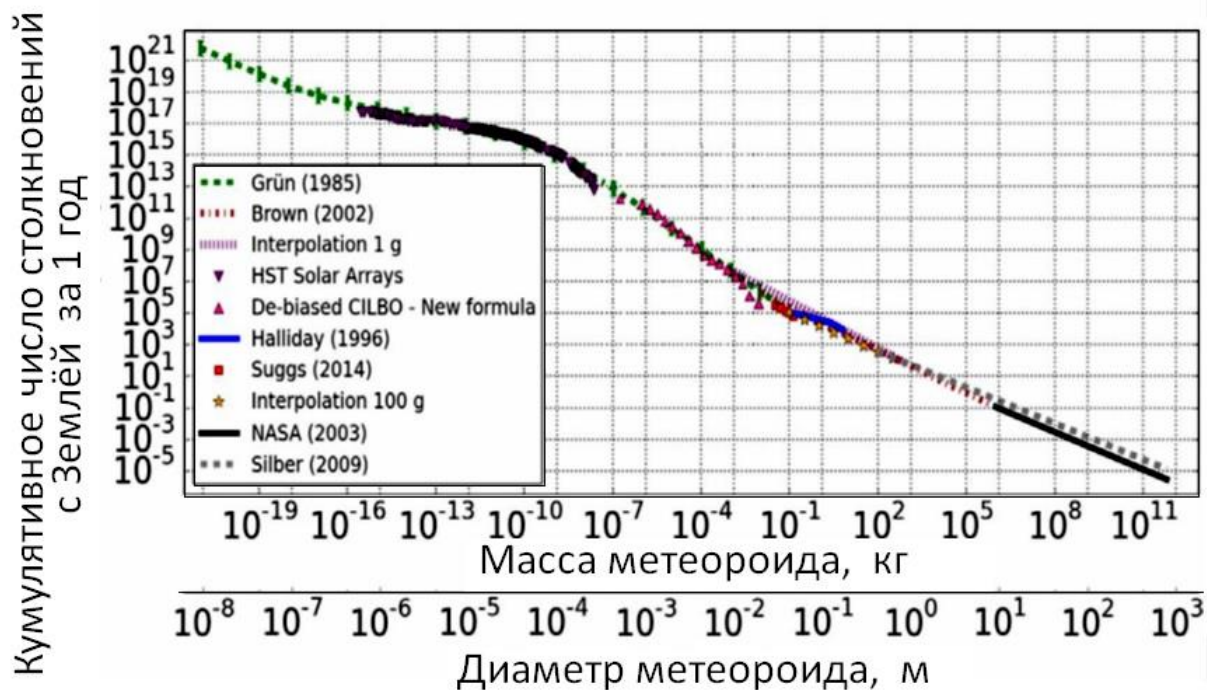


Рис. 5.7. Сводная статистика кумулятивного числа столкновений объектов естественного космического мусора с Землёй (в год).

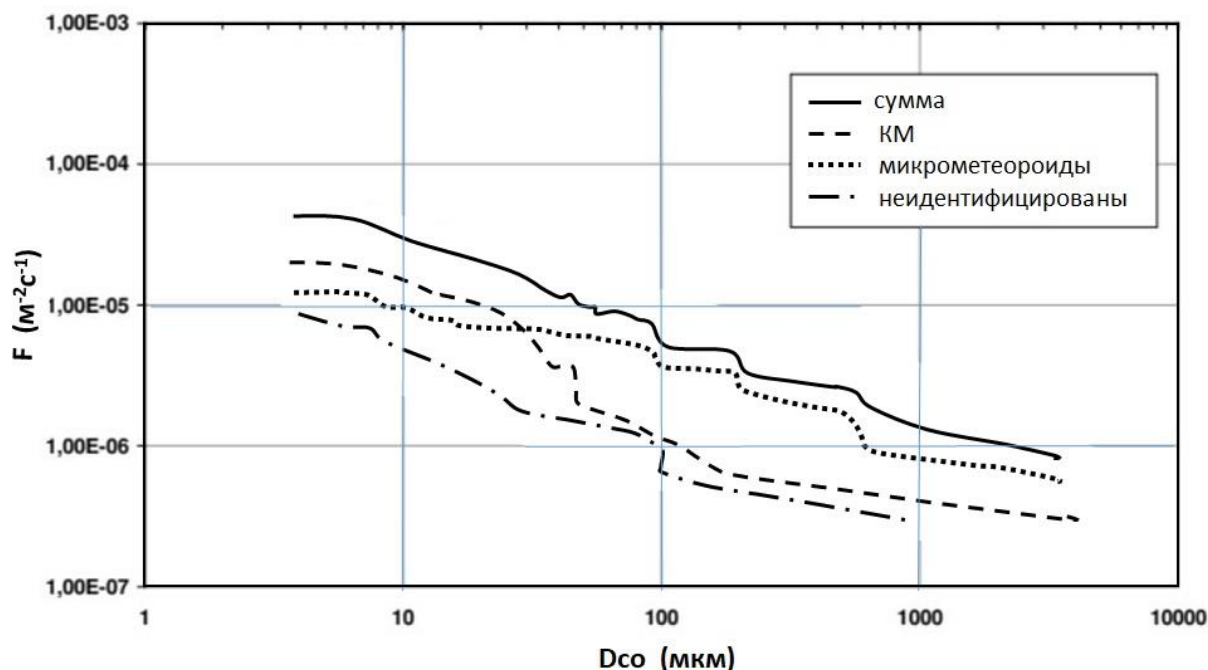


Рис. 5.8. Темп образования кратеров диаметром  $D_{co}$  на солнечных панелях Телескопа им. Хаббла, снятых во время сервисной миссии SM-3 (адаптировано из рис. 4.34 материала ESA Post-Flight Impact Analysis of HST Solar Arrays – 2002).

материалам ESA Post-Flight Impact Analysis of HST Solar Arrays – 2002, в которых представлено разделение техногенных и естественных объектов, выполненных на основе анализа химического состава ударников).

Чтобы получить оценки потоков частиц, была выполнена довольно сложная работа по моделированию высокоскоростных ударов микрочастиц. И хотя, как видно из рис. 5.8, частицы естественного происхождения дают в единицу времени больше кратеров диаметром  $D_{co} > 30$  мкм, чем техногенные микрочастицы, учет того, что скорости микрометеороидов в среднем выше, чем техногенных микрообъектов, приводит к картине, показанной на рис. 5.9.

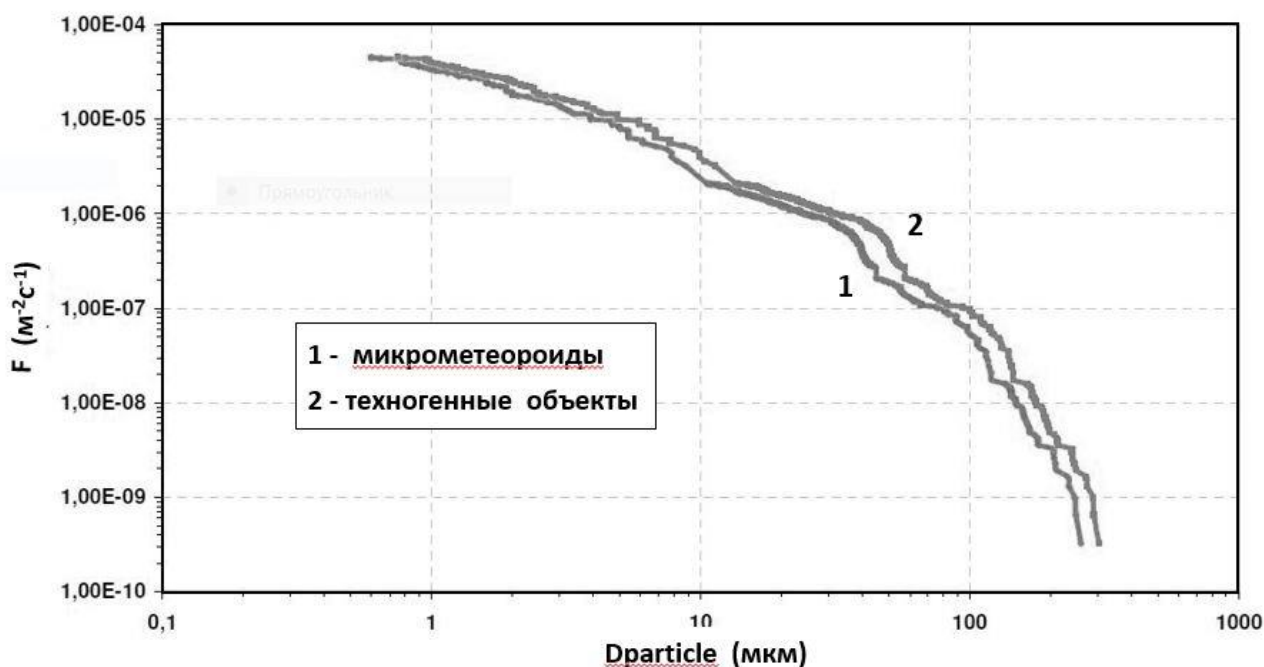


Рис. 5.9. Поток микрочастиц в зависимости от их размера  $D_{particle}$ .

На орбите телескопа поток микрометеороидов в диапазоне размеров менее 300 мкм примерно такой же (чуть ниже), чем поток техногенных микрочастиц размера  $D_{particle}$ . Таким образом, можно предполагать, что на низких орбитах, а также в областях концентрации КА (например, в области геосинхронных орбит), количество техногенного космического мусора может превышать природную составляющую, но во всех других областях ОКП преобладает естественный компонент космического мусора.

### 5.1.3. Факторы риска, обусловленные КМ и методы парирования

Согласно [5.7] уязвимость КА в потоке КМ может быть определена как комбинация вероятностей отказов его различных систем вследствие ударов фрагментов КМ, с учетом важности (критичности) каждой компоненты и их дублирования (избыточности). Количество ударов и их характеристики – это лишь исходная информация для определения ожидаемых последствий и влияния их на выполнение КА своей целевой функции. Возможны следующие виды последствий ударов:

- выход из строя основных систем (приводящие к отказу всего КА);
- повреждения после ударов высокоскоростных фрагментов КМ, воздействия импульсных нагрузок от удара или влияние плазмы, приводящие к отказам или поврежденным элементам КА, но не влияющие на работоспособность КА в целом;
- изменение работы поврежденного элемента во времени;
- поверхностная деградация от ударов.

В последнее время все чаще реализуются риски столкновений действующих космических аппаратов с объектами КМ. Многочисленные примеры можно найти в Интернете. В табл. 5.1. указаны типичные методы противодействия (парирования) угрозе КМ. Не обсуждая здесь методы защиты от мелкой составляющей КМ, отметим, что главным методом защиты рабочего КА от столкновений с крупными частицами КМ является изменение орбиты КА (уклонение). Например, в среднем ежегодно совершается несколько маневров уклонения Международной космической станции (МКС) от угрожающих объектов КМ (см. рис. 5.10).

Маневры уклонения совершает не только МКС, но и многие ИСЗ. Согласно отчету Федеральной комиссии связи США, подготовленному на основе данных, которые компания SpaceX в обязательном порядке передавала ведомству, в период с 1 декабря 2022 года по 31 мая 2023 года спутники Starlink совершили 25 тысяч маневров, чтобы избежать столкновения с объектами на орбите – космическими кораблями, другими спутниками и космическим мусором. Ежедневно спутники в среднем уклоняются от объектов на орбите около 140 раз. Причем от момента запуска спутников в



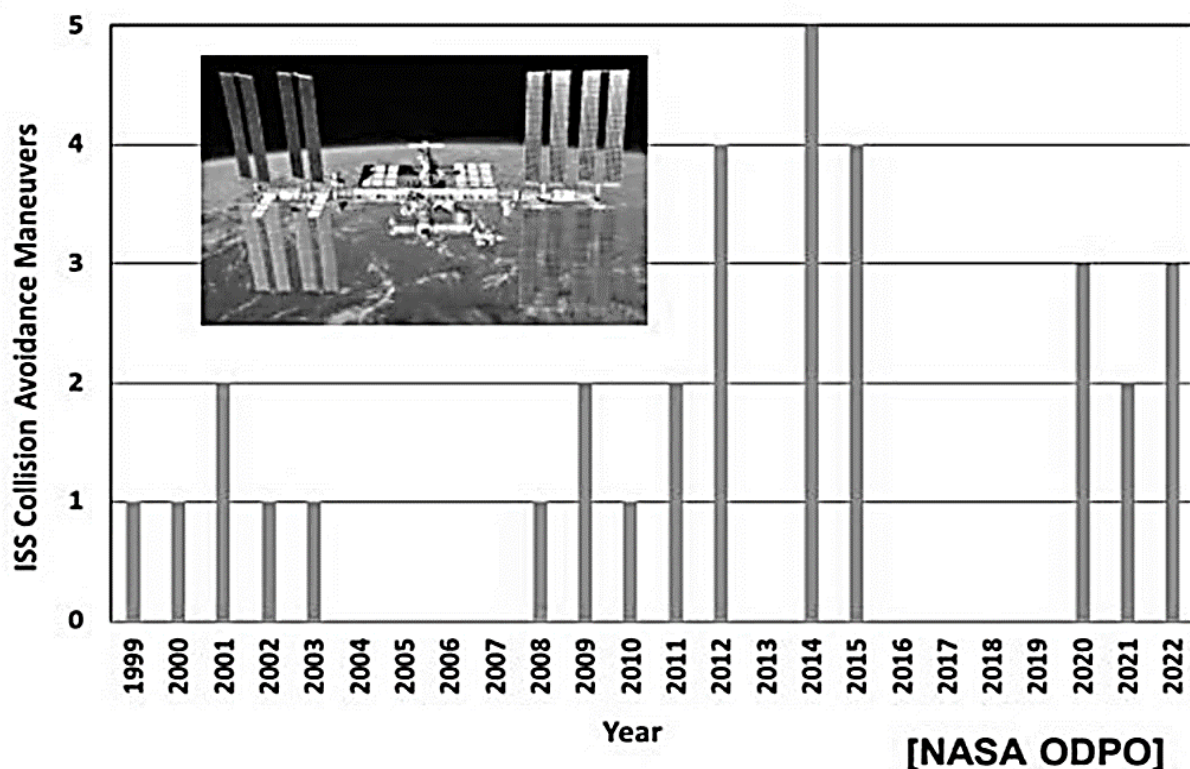


Рис. 5.10. Количество уклонений МКС от угрожающих объектов КМ (по данным NASA).

2019 г. к 2023 г. количество маневров достигло 50 тысяч<sup>3</sup>.

Фатальные столкновения – это серьёзные, хотя и единичные события. Но мы остановимся на аспекте, который может сделать проблему КМ глобальной и постоянной. Это т. н. синдром (эффект) Кесслера [5.8]. Он заключается в самопроизвольном размножении объектов КМ. Столкновение достаточно крупных объектов приводит к появлению большого количества новых фрагментов, которые тоже могут сталкиваться. Может начаться «цепная реакция» рождения всё новых обломков, и это приведет к критическому росту числа опасных фрагментов (даже при условии полного прекращения космических запусков!) и, в конечном итоге, к невозможности использования ОКП для практического использования. В отчете ESA за 2022 г. опубликован прогноз, проиллюстрированный на рис. 5.11.

<sup>3</sup>[https://lenta.ru/news/2023/07/11/failure\\_is\\_not\\_an\\_option/?ysclid=lkjxo9kgp9794330362](https://lenta.ru/news/2023/07/11/failure_is_not_an_option/?ysclid=lkjxo9kgp9794330362)

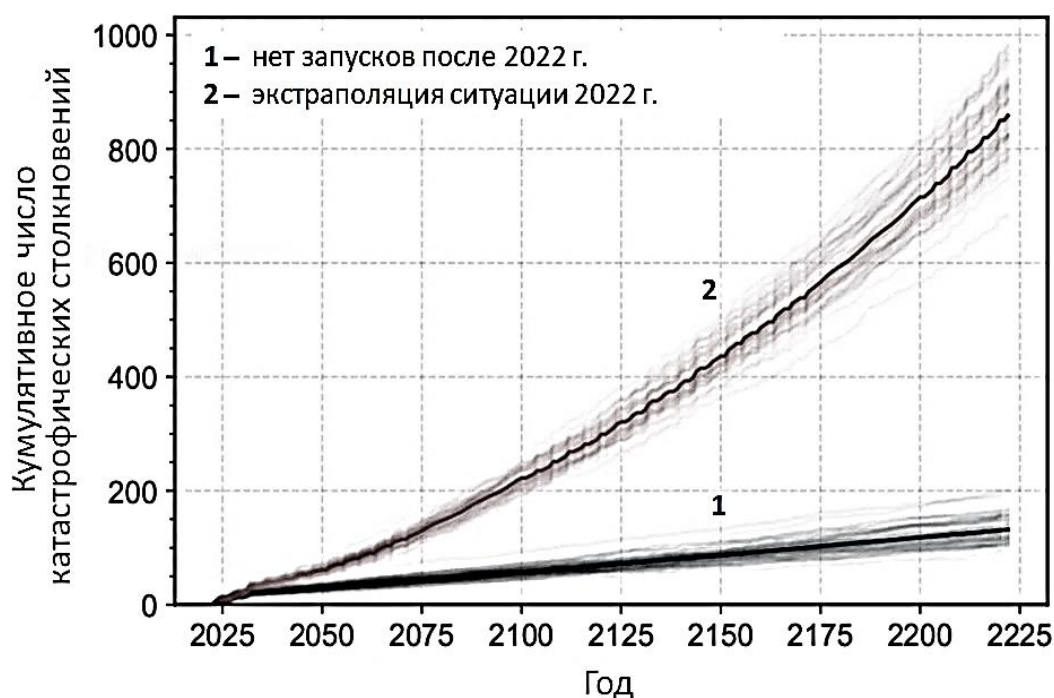


Рис. 5.11. Прогноз катастрофических событий на будущее (из годового отчета ESA на 2022 г.

Следует отметить, что эффект Кesslerа приводит к лавинообразному росту числа фрагментов КМ малых масс и размеров за счет измельчения более крупных фрагментов. Полная масса КМ в зоне действия синдрома Кesslerа не меняется.

Это теоретический сценарий, но уже сейчас некоторые исследователи высказывают опасение, что в наиболее густонаселенных областях ОКП условия для проявления синдрома Кesslerа уже создались.

Как правило, синдром Кesslerа рассматривают в отношении сравнительно крупных объектов ( $>1$  см), способных вывести из строя действующий КА. Но и мелкие частицы являются существенным фактором риска [5.9]. Маломассивные частицы оставляют небольшие кратеры, которые изучаются с помощью микроскопической техники. На рис. 5.12а показано фото такого малого кратера. Для более массивных частиц, способных, например, пробить солнечную панель насквозь, диаметр кратера составляет несколько миллиметров (см. рис. 5.12б и 5.12в). Размер столкнувшейся с панелью частицы в разы меньше диаметра  $D_{co}$ . Это проиллюстрировано на рис.5.12с, частица размером лишь 0.2 мм произвела кратер диаметром 4 мм в иллюминаторе КА Space Shuttle.



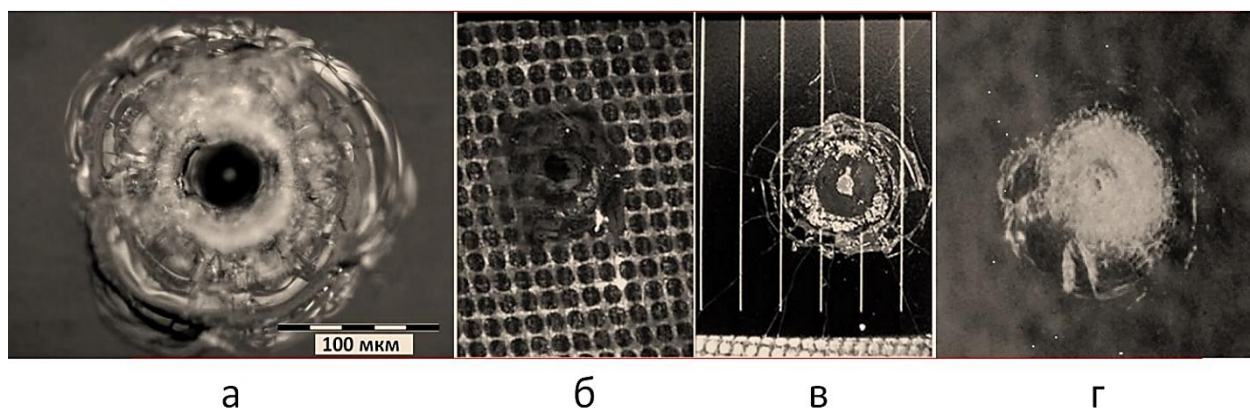


Рис. 5.12. Кратеры, создаваемые частицами КМ на конструкциях космического аппарата: а) – микрократер, произведенный очень мелкой частицей на солнечной панели Телескопа им. Хаббла; б) и в) – кратеры диаметром 5 мм в солнечных панелях этого телескопа; отверстия в центрах кратеров – 0.5 мм; г – кратер диаметром 4 мм на иллюминаторе Space Shuttle от частицы размером 0.2 мм.

Ответ на типичный вопрос – насколько опасен этот малоразмерный компонент, ведь уничтожить космический аппарат столкновения с такими объектами не смогут, однозначен – «опасен!». Такие столкновения наносят ущерб, сродни пескоструйной обработке, особенно солнечным панелям, оптике звёздных датчиков и научных приборов, которые в принципе не могут быть покрыты защитными материалами.

Ещё одна опасность, обусловленная КМ, связана с выпадением на нашу планету сошедших с орбиты крупных техногенных объектов. Особенно резонансными являются падения, сопровождающиеся угрозой химического заражения значительных территорий высокотоксичным топливом ракетных ступеней, а также падения КА с источниками ядерной энергии на борту.

## 5.2. Средства обнаружения и мониторинга объектов космического мусора

В настоящее время в качестве основных средств обнаружения и мониторинга объектов КМ используются радары (только для низкоорбитальной области ОКП) и оптические (оптоэлектронные)

средства. В субмиллиметровом и микронном диапазонах размеров частиц КМ основным средством (апостериорной) регистрации частиц остаются датчики столкновений. На рис. 5.13 показана схема средств, применяемых для наблюдения космического мусора в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения (данные NASA).

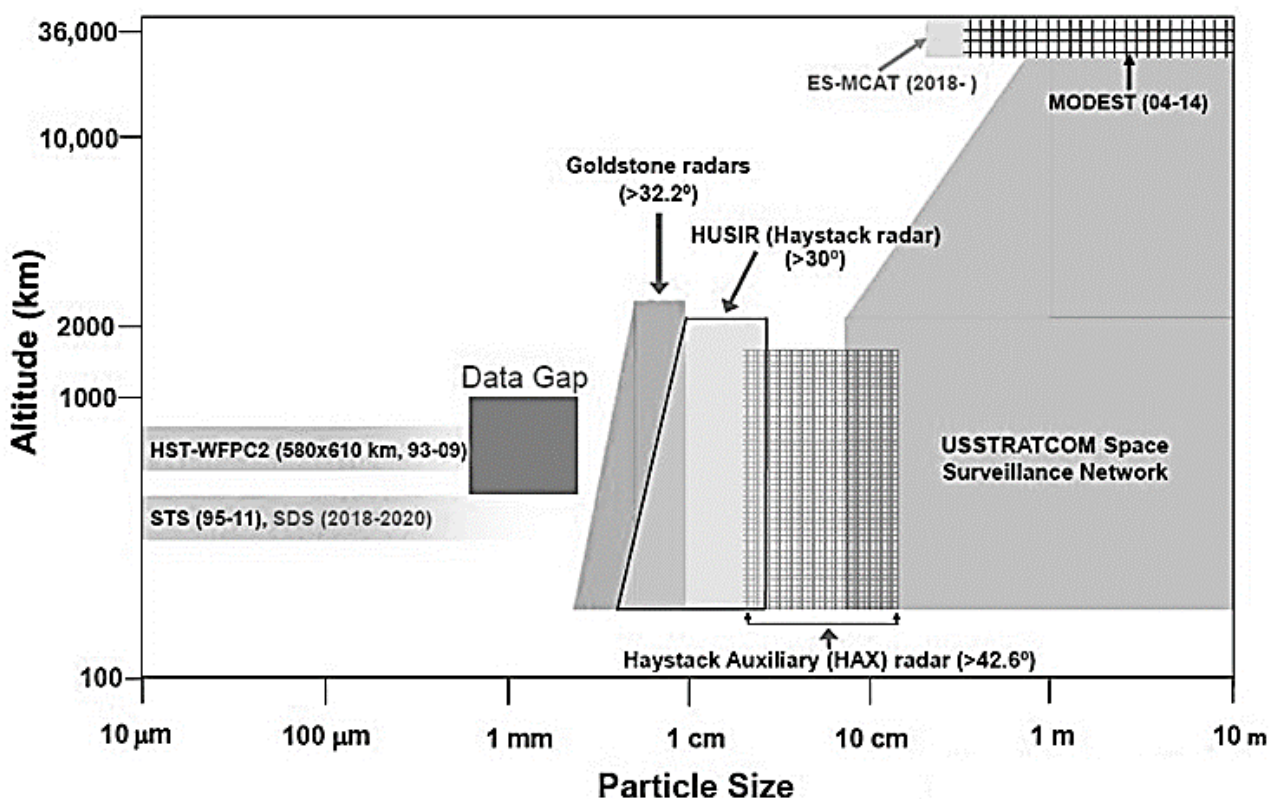


Рис. 5.13. Схема средств, применяемых для наблюдения космического мусора в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения (данные NASA).

Мелкие частицы (до 1 мм) регистрируются датчиками соударений. В качестве одного из датчиков использованы панели солнечных батарей Космического телескопа им. Хаббла. Эти данные уже описывались выше в разделе 5.1. В миллиметровом диапазоне средств наблюдения космического мусора нет и даже датчики столкновений здесь неэффективны из-за малого числа таких событий в пересчете на эффективную площадь детектора. На низких орбитах с современными радарами можно отслеживать объекты КМ размером от 1 см и даже меньше, однако такие объекты в КМ

в дальнейшем очень легко теряются из-за сложности точного прогнозирования их движения. На более высоких орбитах эффективны только оптические средства. Нижний порог размеров КМ для обнаружения такими средствами составляет, как отмечалось выше, 5–30 см в зависимости от высоты орбиты.

Наиболее полный спектр возможностей по обнаружению и мониторингу космического мусора имеют США. В США основную программу по наблюдениям космического мусора осуществляет специальное управление NASA (Orbital Debris Program Office), действует большое число специализированных наблюдательных пунктов и инструментов, в том числе необычных. В их числе обсерватория NASA Orbital Debris Observatory, в которой используется интересный инструмент – ртутный телескоп апертурой 3 м (NASA-LMT). Стратегическое командование США (USSTRATCOM) совместно с наблюдательными центрами Европейского союза ведет каталог известных орбитальных объектов, используя наземные радары и телескопы, а также телескопы космического базирования. Широко применяются радары TIRA, EISCAT (Европа), Goldstone, Haystack и радиолокатор с фазированной антенной решёткой CobraDane (США). Создана значительная система космического базирования для контроля ОКП, включая, естественно, наблюдения КМ, на базе спутников SBV, BLOCK 10, ORS5, GSSAP (США), NEOSSAT, SAPHIRE (Канада). Спутник SBSS Block 10 запущен в сентябре 2010 года (рис. 5.14). Стоимость превышает \$800 млн. Полезная нагрузка – телескоп апертурой 30 см.

Четыре спутника системы GSSAP В (Geosynchronous Space Situational Awareness Program) работают с 2016 г. вблизи геосинхронного пояса, они имеют возможность выполнять операции сближения.

В России в настоящее время наибольший вклад в наблюдения космического мусора вносят средства, созданные и поддерживаемые Госкорпорацией «Роскосмос», в частности, в рамках программы АСПОС (Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях). Наблюдения в рамках этой программы

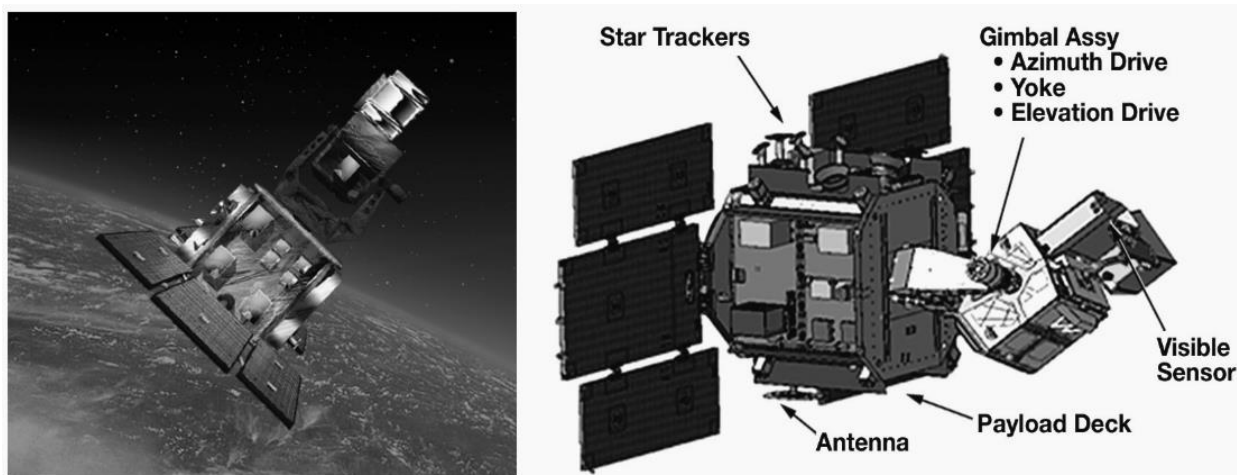


Рис. 5.14. Спутник SBSS (источник: <https://silo.tips/download/space-based-space-surveillance-revolutionizing-space-awareness> ). Показаны звёздные датчики (star trackers), карданный подвес (gimbal assy), датчик оптического диапазона (visible sensor), платформа полезной нагрузки (payload desk), антенна (antenna).

организованы на неплохом уровне, однако, к сожалению, у нас пока нет радаров гражданского назначения, предназначенных для контроля малоразмерного космического мусора на низких орбитах. Отечественная система наблюдений КМ на аппаратах космического базирования также пока не создана. В наблюдениях объектов КМ, находящихся на высоких орбитах, главную роль играют оптические инструменты, и здесь вклад российских инструментальных комплексов значителен. В настоящее время, в основном, используются оптико-электронные средства ГК «Роскосмос», АО «Астрономический научный центр», ПАО «МАК «Вымпел», привлекаемые средства РАН – Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Института солнечно-земной физики СО РАН, Института астрономии РАН и др. На рис. 5.15 показаны некоторые пункты наблюдений Госкорпорации «Роскосмос». Оптико-электронные средства, в частности, включают многие десятки оптических инструментов (телескопов) апертурой от 40–100 см.

Роль исследовательских учреждений РАН и вузов в количественном выражении выглядит относительно скромно, но нужно отметить, что это, как правило, наблюдения самых сложных для обнаружения и мониторинга объектов. Так, в Институте астрономии РАН занимаются в основном наблюдениями малоразмерных



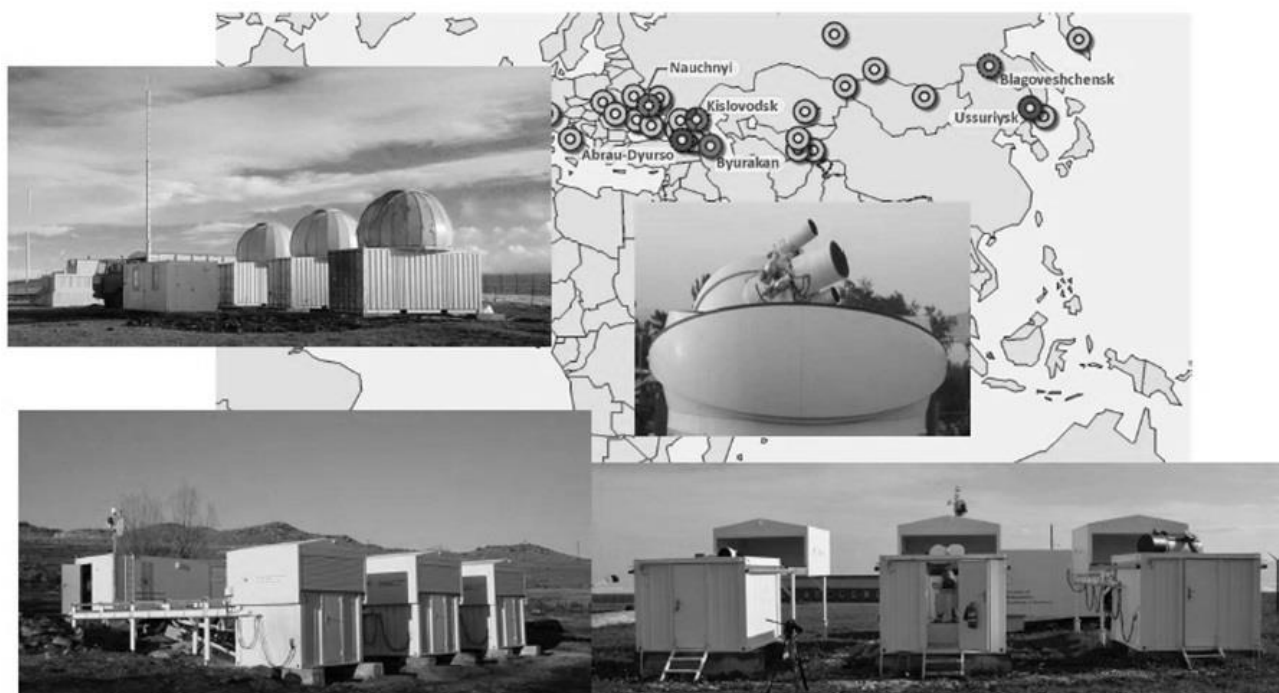


Рис. 5.15. Сеть оптических средств наблюдений ГК Роскосмос.



Рис. 5.16. Телескоп Цейсс-2000 Терскольской обсерватории (филиала ИНАСАН) и кадр с объектом КМ (в рамке) блеском  $19^m$ .

объектов в зоне геосинхронных орбит с помощью довольно крупного телескопа Цейсс-2000 на Терскольской обсерватория (см. рис. 5.16). Со стандартными средствами Роскосмоса проводить такие наблюдения затруднительно.

Как уже отмечалось выше, изучение и мониторинг мелкого космического мусора естественного происхождения ведётся в основном методом регистрации ударов метеорных тел с помощью датчиков, установленных на космических аппаратах. Датчики позволяют изучать плотность потока очень малых частиц массой  $10^{-5}$ – $10^{-15}$  г. В нашей стране и в мире накоплен большой опыт по регистрации таких частиц (см., например, [5.7]), разрабатываются новые, всё более точные методы, основанные на изучении физики высокоскоростного удара.

### **5.3. Модели эволюции населения КМ**

Как отмечалось в разделе 5.1, на современном уровне развития техники наблюдений отслеживается лишь небольшая часть объектов КМ, конкретно, только самые крупные из них. Понятно, что при невозможности регулярного мониторинга мелких объектов для анализа и прогнозирования их поведения применяют статистические модели, описывающие структуру и динамику численности населения таких тел. Хорошее введение в проблему моделирования структуры и эволюции населения КМ дано в [5.10].

В мире есть три основные семейства моделей населения техногенного КМ, развиваемых в России (SDPA), в ESA (MASTER) и в NASA (ORDEM).

Модель SDPA (Space Debris Prediction and Analysis), разработанная группой под руководством А.И. Назаренко (см. ссылки в [5.10]) – это полуаналитическая стохастическая модель для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования техногенного КМ размером более 1 мм в низкоорбитальных областях и на геосинхронных орбитах, используемая для построения пространственного распределения концентрации и скорости КМ, а также оценки риска столкновений. Модель использует суммарные данные о КМ различного размера (без «привязки» их к конкретному источнику загрязнения).

Две модели – MASTER-2009 и ORDEM2010 – являются программными средствами ESA и NASA соответственно [5.11]. Основная цель обеих программ состоит в том, чтобы позволить поль-

зователям оценивать поток объектов на целевой объект для планирования различных миссий. Центральную роль в этом процессе играют результаты наблюдений с помощью радара/телескопа или регистрации ударов на поверхностях, возвращаемых с околоземной орбиты. Модель ESA MASTER (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference) разработана таким образом, чтобы дать реалистичное описание природной среды и среды, состоящей из твердых частиц, созданных человеком. Источники обломков моделируются на основе подробных списков известных исторических событий, таких как фрагментация или запуск твердотопливного ракетного двигателя, или путём моделирования вторичных обломков, таких как выброс при ударе или выброс хлопьев краски с разрушающихся поверхностей КА. Полученная совокупность затем сверяется с данными телескопов/радаров. Модель постоянно совершенствуется. Наиболее свежая версия – MASTER-8 описана в [5.12].

Серия инженерных моделей орбитального мусора NASA (ORDEM, Orbital Debris Engineering Model) предназначена для обеспечения надежных оценок потока орбитального мусора на космические аппараты и в поле зрения телескопа или радара. Центральное место в модельном ряду занимает эмпирический характер исходных совокупностей. Последняя версия серии, ORDEM2010, объединяет результаты более чем двадцатилетних наблюдений с помощью радиолокационных систем NASA, телескопов, датчиков космических соударений и наземных экспериментов.

Что касается метеороидной обстановки, то помимо упоминавшейся выше европейской модели MASTER в США её мониторингом занимается Управление метеороидной среды NASA (MEO). MEO отвечает за поддержку инженерной модели метеороидов (Meteoroid Engineering Model, MEM). Некоторыми из революционных аспектов MEM являются: а) идентификация спорадических источников излучения с реальными источниками метеорных тел, таких как кометы; б) физический подход, т. е. подход, который дает точные значения потоков и их направленности для межпланетных космических аппаратов в диапазоне от 0.2 а.е. до 2 а.е. и в)

распределения скоростей, полученные на основе теории и подтвержденные наблюдениями. При заданном векторе состояния модель даёт распределение частиц потока по массе, а также средние скорости удара и их распределение на поверхностях кубоподобной конструкции с торцом, ориентированным вдоль скорости космического аппарата. Текущая версия МЕМ, МЕМ 3 (см. [5.18]) генерирует данные об окружающей среде для космических аппаратов, вращающихся вокруг Земли, Луны, Меркурия, Венеры, Марса или путешествующих в межпланетном пространстве.

В России с 1987 года применяется национальный стандарт ГОСТ 25645.128-85, который устанавливает модель пространственного распределения метеорных тел массой  $10^{-6}$ – $10^2$  г в плоскости эклиптики на расстояниях до  $10^6$  км и тел массой  $10^{-9}$ – $10^{-6}$  г в пределах 200–1000 км от Земли. Что касается космического мусора, то с 2022 года мы используем национальный стандарт ГОСТ Р25645.167-2022 «Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве».

#### **5.4. Особенности движения объектов КМ техногенного и естественного происхождения**

Движение объекта КМ, как и любого другого объекта, вращающегося вокруг Земли, описывается уравнениями движения с учетом наиболее существенных возмущающих сил, таких как:

- гравитационное влияние Земли,
- гравитационное влияние Луны, Солнца, а также других крупных тел Солнечной системы,
- влияние давления солнечной радиации,
- влияние верхней атмосферы Земли.

Запишем уравнение движения в форме, использованной в [5.13]. В инерциальной системе координат ЕМЕ2000, связанной с экватором и равноденствием Земли эпохи 1 января 2000 г., уравнения движения космического объекта записываются в форме:



$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = & -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{A}_{GCS}^{EME2000} [\mathbf{f}_{gf}(\mathbf{r}_{GCS}) + s\mathbf{f}_{atm}(\mathbf{r}_{GCS}, \mathbf{v}_{GCS})] + \\ & + \mathbf{f}_{pm}(\mathbf{r}) + k\mathbf{f}_{sp}(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где

$\mathbf{r}$  – координаты КА в системе координат EME2000,

$\mathbf{r}_{GCS} = \{x_{GCS,x}, y_{GCS,y}, z_{GCS,z}\}^T = \mathbf{A}_{EME2000}^{CGS} \mathbf{r}$  – координаты КА в системе координат GCS (географической системе координат),

$\mathbf{v}$  – вектор скорости КА в системе координат EME2000,

$\mathbf{v}_{GCS} = \{v_{GCS,x}, v_{GCS,y}, v_{GCS,z}\} = \mathbf{A}_{EME2000}^{CGS} \mathbf{v} + \mathbf{v}_\omega$  – вектор скорости КА в гринвичской вращающейся системе координат,

$\mathbf{v}_\omega = \begin{Bmatrix} \omega y_{GCS} \\ -\omega x_{GCS} \\ 0 \end{Bmatrix}$  – вектор, характеризующий изменение скорости

при переходе из гринвичской фиксированной системы координат в гринвичскую вращающуюся систему координат,

$\mathbf{A}_{EME2000}^{CGS}$  – матрица перехода из системы координат EME2000 в системе сгс,

$\mu$  – гравитационная постоянная Земли,

$\mathbf{f}_{gf}$  – (gravity field) функция для расчета возмущающего ускорения КА, обусловленного гармониками гравитационного поля Земли,

$s\mathbf{f}_{atm}(\mathbf{r}_{GCS}, \mathbf{v}_{GCS})$  – (atmosphere) функция для расчета возмущающего ускорения КА, вызванного влиянием атмосферы,

$s$  – баллистический коэффициент,

$\mathbf{f}_{pm}$  – (point mass) функция для расчета возмущающего ускорения КА, вызванного влиянием гравитационного поля Солнца, Луны и планет,

$k\mathbf{f}_{sp}(\mathbf{r})$  – (solar pressure) функция для расчета возмущающего ускорения КА, вызванного давлением солнечной радиации,

$k$  – коэффициент светового давления.

Факторы гравитационного характера, определяющие движение объекта КМ, к настоящему времени довольно хорошо опре-

делены. Известную проблему представляет для прогнозирования движения объектов на низких орбитах нестационарность земной атмосферы. Атмосфера может влиять на движение объектов на орбитах высотой до ~800 км. Вследствие недостаточно надежно и своевременно прогнозируемых эффектов влияния солнечной активности на земную атмосферу высотный профиль плотности атмосферы может изменяться весьма существенно. Соответственно, существенно изменяется на данной высоте и сила торможения.

На больших высотах сопротивление атмосферы можно не учитывать, но для фрагментов КМ с большим отношением площади к массе (ОПМ) возмущения, обусловленные радиационными силами, становятся вторыми по величине после гравитационных факторов.

Кажущийся совершенно очевидным термин ОПМ всё-таки требует пояснения, поскольку довольно часто его используют некорректно. Отношение площади к массе характеризует геометрию объекта. Эта величина обычно не меняется со временем. Например, ОПМ листа бумаги для принтера формата А4 (80 г/м<sup>2</sup>) составляет (учтена двусторонность листа) 25 м<sup>2</sup>/кг.

Обычно отношением площади к массе называют отношение  $A/m$  площади  $A$  миделева сечения, т. е. максимального по площади сечения плоскостью, перпендикулярной к направлению движения объекта, к массе  $m$ , это т. н. «баллистический коэффициент». Баллистический коэффициент используется в прогнозировании движения объектов на низких орбитах, где существенно влияние атмосферы. Для ориентированных по направлению движения объектов баллистический коэффициент со временем не меняется. Для вращающихся объектов несферической формы баллистический коэффициент, естественно, меняется, хотя в среднем на шкале времени, существенно большей периода вращения, можно использовать некоторое среднее значение.

На рис. 5.17 показано распределение объектов космического мусора в геостационарной области по отношению  $A/m$ . Распределение построено по данным из открытого источника [5.14], содержащего некоторые результаты мониторинга объектов космического мусора в основном в области высоких орбит. Данные на 17

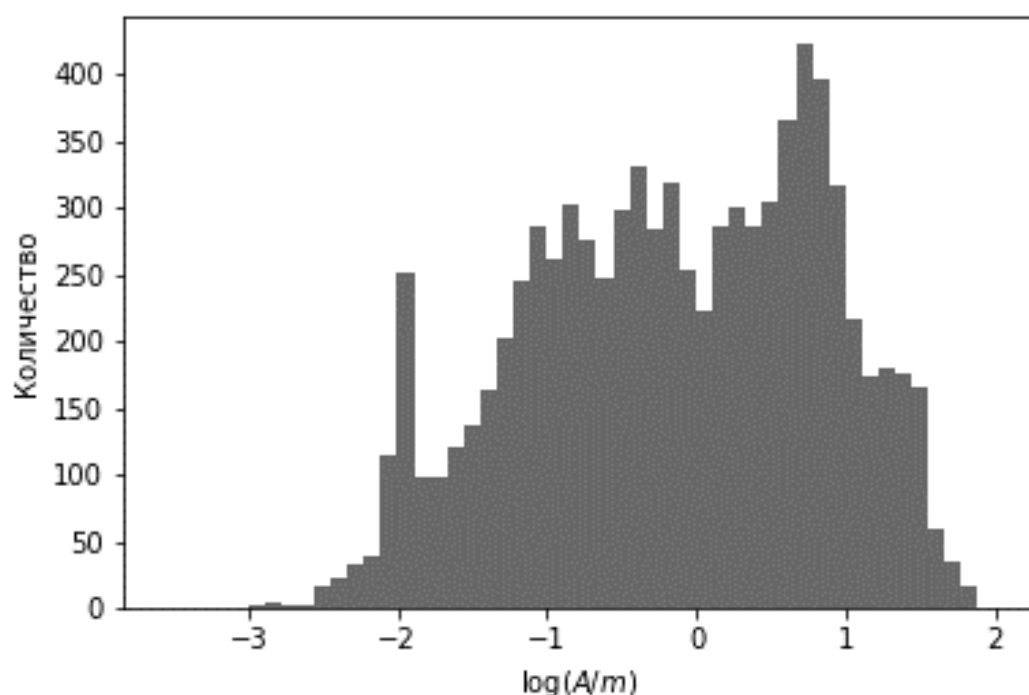


Рис. 5.17. Распределение объектов КМ по отношению  $A/m$ . [5.14].

июля 2023 г. содержали 8335 записей. Как видно из этого рисунка, доля объектов с повышенным и высоким отношением  $A/m$  весьма значительна.

Для объектов на более высоких орбитах относительно существеннее вклад давления излучения (основной составляющей радиационных сил). Под радиационными силами понимают давление излучения и эффект Ярковского. Часто давлением излучения называют только его радиальную составляющую (прямое давление), влияние нерадиальной составляющей называют эффектом Пойнтинга-Робертсона. Прямое давление излучения – весьма важный, и даже определяющий динамический фактор для частиц размером менее нескольких мкм. Такие частицы выдуваются давлением излучения из Солнечной системы весьма быстро. Характерное время удаления частиц размером менее  $\sim 1$  мкм с расстояния 1 а.е. измеряется годами. Под действием эффекта Пойнтинга-Робертсона частица размером 1 см, движущаяся по орбите вокруг Солнца, тормозится и по спирали падает на Солнце примерно за 1 млн лет. Для более мелких части (вплоть до нескольких микрон)

это время уменьшается пропорционально размеру пылинки. Эффект Ярковского проявляется для более крупных тел (до нескольких десятков км) и на гораздо большей шкале времени (миллионы и более лет). Для полноты представления отметим, что давление солнечного ветра (корпускулярного потока) на несколько порядков меньше давления светового потока. Таким образом, для прогнозирования на относительно короткой шкале времени движения объектов КМ размером от микронов до нескольких метров (с большим  $A/m$ ) из радиационных факторов достаточно учитывать прямое световое давление.

Для характеристики действия радиационных сил рекомендуется употреблять термин «парусность». Сила давления излучения на космический объект зависит от его размеров, формы, ориентации тела в световом потоке и отражающих свойств. Парусность, т. е. отношение максимальной площади поперечного (перпендикулярного световому потоку) сечения тела к его массе, кажется близкой по смыслу к баллистическому коэффициенту, она, так же как и баллистический коэффициент имеет вид  $A/m$ , но здесь задающее направление определяется не вектором движения тела, а направлением светового потока. В большинстве случаев рассматривается световой поток от Солнца, в некоторых случаях учитывается и поток, отраженный от Земли. Парусность может принимать высокие значения в десятки  $\text{м}^2/\text{кг}$ , например, для субмикронных пылевых частиц, а также и для искусственных конструкций типа зеркальных солнечных парусов, околоземных спутников-баллонов, фрагментов экранно-вакуумной теплоизоляции и т. д.

Влияние светового давления приводит к существенным изменениям эксцентриситета и наклона орбит объектов с большой парусностью. Наибольшую трудность в прогнозировании движения таких объектов представляет тот факт, что они имеют сложную форму поверхности, участки которой характеризуются разной отражательной способностью, а также тем, что такие объекты вращаются относительно центра масс, что вызывает непрогнозируемые изменения парусности. Это, как следствие, приводит к ошибкам прогноза положения таких объектов даже на коротких (суточных) интервалах времени.

Представления о сложностях учета радиационных сил при прогнозировании движения космических объектов в ОКП можно получить, ознакомившись со специальной литературой (см., например, [5.15]). Нерешенных проблем в этом направлении исследований остается еще немало.

## **5.5. Существующие и перспективные методы очистки околоземного космического пространства**

Существуют две широкие категории технологий уменьшения концентрации космического мусора: активные и пассивные.

1. Предотвращение (mitigation) – минимизация количество КМ при запусках и технологических экспериментах. Это пассивный подход.
2. Активная очистка (active removal) – методы, направленные на сбор и удаление объектов КМ с текущей орбиты: либо на более низкую орбиту (для сгорания в атмосфере), либо на орбиту захоронения. Применяется либо специальный КА, либо средства воздействия наземного базирования.

Кратко охарактеризуем пассивные, а затем активные методы. Для иллюстрации приведем несколько примеров.

Что касается пассивных мер, то цели и основополагающие принципы деятельности по предупреждению образования космического мусора (предотвращение), принятые и применяемые несколькими национальными и международными организациями космических держав оформлены в виде специальных документов. В документах [5.16] Межагентского координационного комитета по космическому мусору (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADS) указываются следующие меры:

- ограничение количество объектов, освобождаемых (выпускаемых на орбиту) во время обычных операций;
- сведение к минимуму вероятности аварий на орбите;
- предотвращение столкновений на орбите;
- утилизация космических аппаратов и орбитальных ступеней, срок службы которых истёк.

На международном и на локальных уровнях также рассматриваются аспекты ограничения риска для людей на Земле в результате вхождения в атмосферу (падения) КА.

В целом, руководящие принципы по предупреждению образования космического мусора определяют, что должно быть достигнуто, но не описывают, как организовать и выполнить необходимую работу для достижения поставленных целей. Однако меры по смягчению последствий могут быть эффективно реализованы только в том случае, если они планируются с самого начала, начиная с этапа планирования космического проекта. Это позволяет на ранней стадии выявлять любые потенциальные проблемы, связанные с несоблюдением требований, и разрабатывать план их решения эффективным с точки зрения затрат и своевременным образом.

Активные методы могут предполагать использование средств как космического, так и наземного базирования. Рассмотрим сначала средства космического базирования. Они весьма разнообразны, и мы рассмотрим лишь наиболее часто обсуждающиеся. Чтобы быть эффективными, такие активные средства должны соответствовать определенным требованиям. Понятно, что наиболее важным исходным требованием является наличие системы осведомлённости о ситуации в ОКП (в англоязычной литературе – Space Situation Awareness, SSA), которая предназначена обнаруживать и характеризовать космические объекты, т. е. выявлять свойства природных и рукотворных космических объектов. Далее рассматриваются различные методы (группы методов):

#### Захват.

После выбора интересующего (крупного) объекта нужен запуск специального КА-уборщика с устройством захвата. Когда устройство захвата и цель оказываются на одной орбите, следующим шагом является сближение, которое опирается на оптические датчики и/или радар, затем следует захват. Существует два типа механизмов захвата: контактный и бесконтактный. Контактные методы включают роботизированные руки, щупальца и сети или гарпуны, в то время как бесконтактные методы используют электростатические силы и т. д. Наконец, система наведения, навига-

ции и управления КА-уборщика должны обеспечить увод объекта с орбиты. Учитывая строгие требования к конструкции подобной системы, технология таких проектов всё ещё находится на стадии исследований и разработок, но при этом многие решения уже прошли наземные и даже летные испытания.

Команда из Университета Surrey (Великобритания) провела испытания «космического уборщика» (RemoveDebris) массой 100 кг, который вышел на орбиту в июне 2018 г. 17 сентября 2018 г. был выполнен этап 1: с КА-уборщика выпущен пикоспутник (кубсат, CubeSat), который раздулся в сферу диаметром 1 м), и на него с основного КА была накинута сеть. 8-го февраля 2019 г. был проведен опыт по использованию гарпуна для протыкания и удержания этой модели космического мусора. 4-го марта был выпущен специальный якорь (тормозной парус), но он не раскрылся. Подробнее см. на <https://www.surrey.ac.uk/surrey-space-centre/missions/removedebris>. ESA планирует крупномасштабный эксперимент такого типа e-Deorbit в 2025 г. Цель – захват и спуск ИСЗ Envisat (масса 8 т!). В марте 2021 года японская компания Astroscale запустила Elsa-d, миссию по моделированию удаления КМ с участием двух спутников, в которой один должен был состыковываться с другим с помощью магнитной пластины. Швейцарский стартап ClearSpace планирует использовать другой подход в своей миссии 2025 года по очистке ClearSpace-1. Механизм захвата состоит из длинных роботизированных манипуляторов, которые должны окружить цель – верхнюю ступень, отброшенную КА Vega Европейского космического агентства.

### Торможение и увод в плотные слои атмосферы.

На низких орбитах могут быть эффективны тормозные паруса. Они увеличивают лобовое сопротивление движущихся объектов за счет увеличения площади их поверхности, тем самым ускоряя сгорание обломков при возвращении в атмосферу Земли. В начале сентября 2021 года исследователи Университета Purdue (США) отправили в космос прототип КА с таким тормозным парусом (drag sail) Firefly Alpha, который, к сожалению, взорвался вскоре после запуска. В общем, работы продолжаются.

Средства наземного базирования опираются на лазерные тех-

нологии. На рис. 5.18 показана скачанная из Интернета схема действия мощного наземного лазера. Импульсы лазера вызывают отток (испарение) вещества с поверхности обстреливаемого объекта КМ, что позволяет изменить его орбитальную скорость.

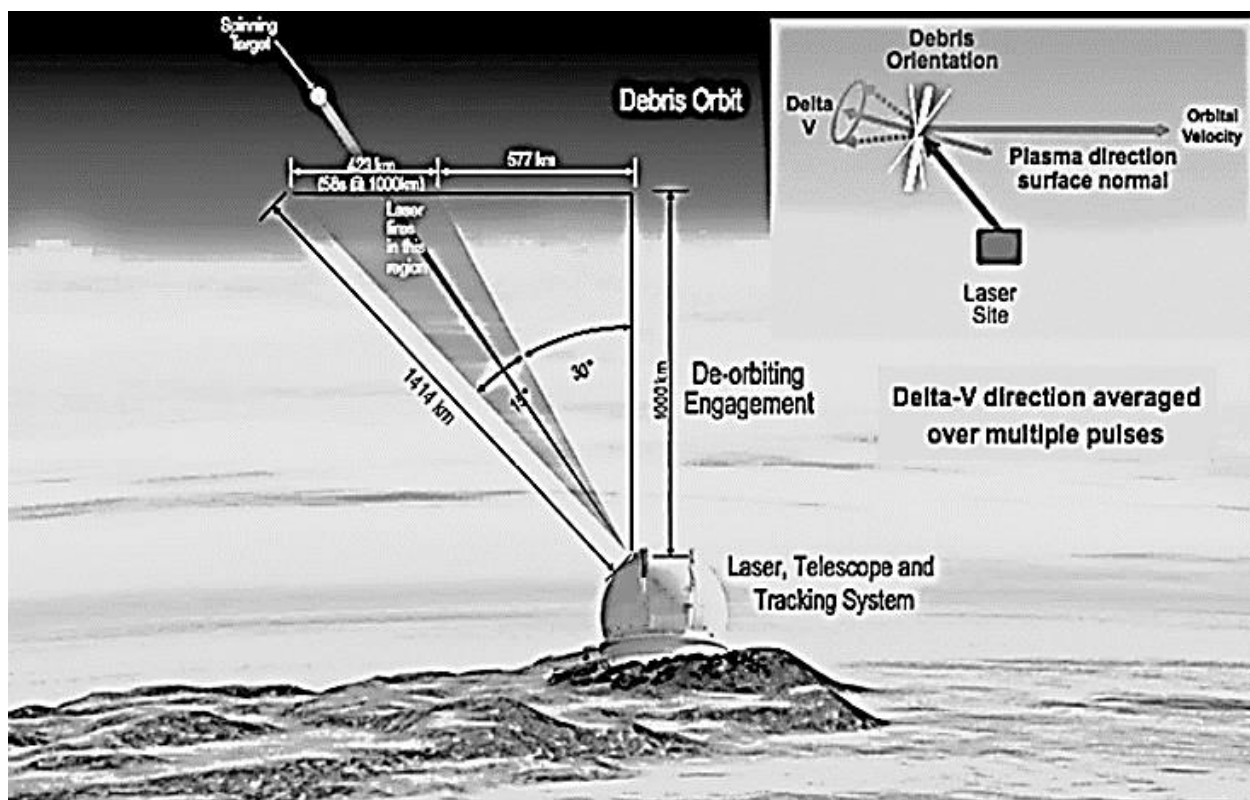


Рис. 5.18. Схема использования мощного наземного лазера для изменения орбиты фрагмента космического мусора.

В российских исследовательских центрах также рассматривается много различных технических решений, в числе которых: сборщик КМ, буксир для крупных объектов, средства увеличения миделевого сечения объектов КМ на низких орбитах (баллоны, «плавучие якоря» и т.д.), электродинамические тросовые системы, лазерные средства изменения орбиты КМ, пучковые средства и др. В качестве примера из российской практики можно назвать предложения по уводу объектов КМ с помощью наземных лазеров и лазеров космического базирования, разрабатываемые, в частности, в Институте прикладной физики РАН, и пучковые методы, разрабатываемые в МАИ.



Особый интерес представляет изучение возможностей использования материалов, из которых состоят объекты космического мусора, например, в качестве рабочего тела в электрических двигательных установках КА, которые сами занимаются сбором КМ. В Федеральную космическую программу России на 2016–2025 гг. включено создание к 2025г. «уборщика» мусора с геостационарных орбит «Ликвидатор». Однако сейчас судьба проекта неясна.

#### Увод на орбиты захоронения.

Увод объектов с высоких орбит в плотные слои атмосферы энергетически невыгоден. Рекомендуется такие КА перед самым окончанием срока их эксплуатации уводить на орбиты захоронения. Для спутников, находящихся на геостационарной орбите и геосинхронных орбитах, орбиты захоронения находятся на расстоянии нескольких сотен километров от рабочей орбиты. Рекомендуемое Межагентским координационным комитетом по космическому мусору (МККМ, IADC) минимальное увеличение высоты  $\Delta H$  в перигее в таких случаях составляет

$$\Delta H = 235 \text{ км} + (1000 C_r \frac{A}{m}) \quad (5.2)$$

где  $C_r$  – коэффициент давления солнечного излучения,  $A/m$  – парусность. 235 км складывается из 200 км (размер защищаемой области) и 35 км – размера области вариаций, вызванных гравитационными возмущениями (в первую очередь солнечными и лунными). Поясним понятие защищаемой области. В 2002 г. по инициативе МКММ Научно-техническим подкомитетом Комитета ООН был принят документ «Руководящие принципы МККМ по предупреждению образования космического мусора», который регулярно редактируется и обновляется на основе последних данных. В этом документе были определены две защищаемые области в ОКП: область низких орбит (НОО) и область геосинхронных орбит (ГСО) (см. подробнее в [5.19]).

Исследователи изучают возможность использования солнечных и тормозных парусов. Солнечные паруса могут транспортиро-

вать мусор на орбиты захоронения. Команда из Университета Флориды смоделировала увод с орбиты спутника ГСО с помощью солнечного паруса, прикрепленного к CubeSat.

## **5.6. Внутрিরоссийская и международная кооперация по проблеме КМ. Правовые вопросы**

Единственными юридически обязательными международными соглашениями, которые могут иметь отношение к космическому мусору, являются Договор о космосе 1967 года (полное официальное название «Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела»), Конвенция об ответственности 1972 года и Конвенция о регистрации 1975 года. Однако ни в одном из них прямо не определяется термин «космический мусор» и не рассматривается ответственность государств за его удаление. Таким образом, неясно, несут ли запускающие государства ответственность за любой последующий ущерб, причиненный их собственным мусором. Поскольку Договор о космосе провозглашает космос глобальным достоянием, государствам выгоднее оставлять свой космический мусор нетронутым, а не удалять его. В то время как статья III Конвенции об ответственности возлагает вину за ущерб, причиненный космическому объекту или лицам, находящимся на борту космического объекта, на запускающее государство, не существует минимального стандарта для установления вины, если в ходе операции по удалению мусора случайно образуется больше обломков. Как уже упоминалось, В 2002 году крупный международный форум МККМ стал первым, кто опубликовал руководящие принципы по предупреждению образования космического мусора. Тем не менее, по состоянию на 2015 год только 60% от общей массы полезной нагрузки, срок службы которой приближается к концу на низкой околоземной орбите, соответствует этим рекомендациям.

Тема кооперации и правовых вопросов, пожалуй, наиболее сложная, поскольку здесь доминируют не законы природы, а гораздо более сложные и противоречивые законы человеческого общества. Для введения в тему рекомендуем работу [5.17].

## 5.7. Над чем работать

Проблема космического мусора пока ещё далека от решения. Мы находимся на стадии интенсивного её изучения, и роль науки здесь особенно значима. Можно выделить три основные направления исследований и работ по проблеме КМ: обнаружение и мониторинг объектов КМ, оценка рисков и разработка методов предотвращения засорения и очистки ОКП. Эти направления формулируются как типичные прикладные, но в каждом из них роль фундаментальных исследований весьма существенна, хотя и не всегда очевидна.

Перечислим некоторые вопросы, привлекающие внимание астрономов и требующие междисциплинарного подхода с участием геофизиков, физиков, механиков, баллистиков, специалистов по материалам, по методам работы с большими данными и т.д. Отметим также важную роль экспертов по космическому праву, но, к сожалению, в России их крайне мало. Список включает следующие темы:

- характеристики распределения естественного и техногенного КМ в ОКП и зависимость этого распределения от различных условий и факторов (вхождение в метеороидные потоки, солнечная активность и т.д.);
- модели населённости КМ и анализ условий реализации синдрома Кесслера;
- совершенствование технологий и средств наблюдения, применяемых в астрономии: методы наблюдений очень слабых объектов (например, малоразмерных КА);
- методы точного прогноза движения объектов сложной формы;
- методы восстановления изображений космических объектов;
- развитие динамических моделей атмосферы;
- уточнение физики высокоскоростных ударов;
- уточнение физики входа в атмосферу;
- физика и химия разрушений под действием космических факторов;
- новые принципы увода отработавших КА и очистки ОКП от КМ;

- новые подходы к утилизации КМ (например, перспективные принципы повторного использования элементов узлов отработавших КА);
- развитие технологии Больших данных (BigData) для решения задач КМ;
- изучение проблемы мусора на других телах Солнечной системы (мусор в окололунном пространстве и на Луне, мусор, связанный с разработкой космических ресурсов и мер отражения астероидной опасности, и т.д.);
- роль фактора КМ в моделях устойчивого развития космической деятельности.

### *Литература к разделу*

- 5.1 Klinkrad H., Space Debris. Models and Risk Analysis, Springer, p.430, 2006.
- 5.2 Райкунов Г.Г. (ред.), Космический мусор. Книга 1: Методы наблюдения и модели космического мусора; М: Физматлит, 2014.
- 5.3 Райкунов Г.Г. (ред.), Космический мусор. Книга 2: Предупреждение образования космического мусора, М: Физматлит, 2014.
- 5.4 Вениаминов С.М. Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия, М: ИКИ РАН, 2023.
- 5.5 Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. № 06. С. 123–142, 2015.
- 5.6 Drolshagen, G., Koschny, D., Drolshagen, S., Kretschmer, J., Poppe, B. Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets // Planetary and Space Science, Volume 143, p. 21-27, 2017.
- 5.7 Сёмкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В, И. Пияков И.В. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождений // Прикладная физика No 1, стр. 86-102, 2009.
- 5.8 Kessler D. J., Cour-Palais B. G. [Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt](#) // [Journal of Geophysical Research](#). Vol. 83. P. 63, 1978.
- 5.9 Новиков Л.С. Воздействие твёрдых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М: Университетская книга, 2010.
- 5.10 Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. М: ИКИ РАН, 216 с., 2013.

- 5.11 Flegel S., Krisko P., Gelhaus J., Wiedemann C., Moeckel M., Krag H., Klinkrad H., Xu Yu-Lin, Horstman M., Matney M., Vörsman P. Modeling the space debris environment with MASTER2009 and ORDEM2010. 38, 2010. [https://www.researchgate.net/publication/239751139\\_Modeling\\_the\\_space\\_debris\\_environment\\_with\\_MASTER2009\\_and\\_ORDEM2010](https://www.researchgate.net/publication/239751139_Modeling_the_space_debris_environment_with_MASTER2009_and_ORDEM2010).
- 5.12 Braun V., Horstmann A., Lemmens S., Wiedemann C., Boëtcher L. Recent developments in space debris environment modelling, verification and validation with MASTER // Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021, published by the ESA Space Debris Office Ed. T. Flohrer, S. Lemmens & F. Schmitz, (<http://conference.sdo.esoc.esa.int>, May 2021).
- 5.13 Боровин Г.К., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Усовик И.В. Построение модели эволюции объектов малоразмерной фракции космического мусора, образующегося в результате разрушений, Препринт ИПИМ №75, Москва, 2021.
- 5.14 SC Vimpel Data Portal, Orbit parameters of newly detected HEO space debris objects. URL: <http://spacedata.vimpel.ru/ru>. Accessed June 05, 2023.
- 5.15 Бурдин И.А. Методика построения высокоточной согласующей модели радиационного давления навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС (диссертация). [https://mai.ru/upload/iblock/a34/Dissertatsiya\\_Buridin.pdf?ysclid=lkgonunkg476831627&referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fsearch%2F%3Ftext%3DDissertatsiya\\_Buridin.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/a34/Dissertatsiya_Buridin.pdf?ysclid=lkgonunkg476831627&referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fsearch%2F%3Ftext%3DDissertatsiya_Buridin.pdf)
- 5.16 IADC Space Debris Mitigation Guidelines, IADC-02-01, 2007, Support to the IADC Space Debris Mitigation Guidelines IADC-04-06, Rev 5.7 December 2019.
- 5.17 Волынская О.А. Организационно-правовые вопросы международного сотрудничества по проблеме космического мусора // Научные труды Института астрономии РАН, т. 7, № 1, с. 7-15, 2022.
- 5.18 Moorhead, A. V. Meteoroid Engineering Model (MEM) 3: NASA's Newest Meteoroid Model // LPI Contributions, Vol. 2109, First International Orbital Debris Conference, id.6054, 2019.
- 5.19 Миронов В. В., Усовик И. В. Ретроспектива проблемы космического мусора. Часть 1. Техногенное засорение космического пространства и средства его контроля // Космические Исследования, Т. 58, № 2, С. 117–130, 2020.

## 6. ПРОБЛЕМА ПЛАНЕТАРНОЙ БИОЗАЩИТЫ

Эта глава – самая сжатая по объему. Будучи астрономами, авторы не взяли на себя смелость представить глубокий экскурс в проблему и ограничились довольно общими сведениями, которые полезно знать каждому.

Тем не менее, эта тема весьма многопланова и напрямую связана с, пожалуй, самой важной научной и общечеловеческой проблемой – проблемой происхождения, эволюции и возможного угасания такого удивительно процесса, как жизнь. Здесь «задействованы» многие науки: физика космоса, астробиология (или как сейчас часто называют эту науку биоастрономия), биология, геофизика, космическое материаловедение и технологии, философия, этика в самом широком понимании и т.д. Хороший пример детального описания сложного комплекса исследований и мероприятий по планетарной биозащите представлен в [6.1].

Проблема планетарной защиты является одной из ключевых проблем при освоении дальнего космоса. Экспансия человечества в космос с использованием автоматических или пилотируемых космических кораблей неизбежно означает вынос в космос земной жизни, прежде всего, в виде микроорганизмов. Вынос может быть непреднамеренным, хотя в последние годы, в связи с обострившейся гонкой за космические минеральные ресурсы, обсуждаются концепции нацеленного использования микроорганизмов для «биодобычи», т. е. использования их для извлечения важных минералов из горных пород на других телах Солнечной системы.

Процесс выноса элементов жизни в космос и их транспортировки на большие расстояния – не всегда предполагает вмешательство человека или каких-то других существ. Например, когда речь идет о Марсе, то некоторые исследователи (см. [6.2]) считают, что какие-то формы земной жизни уже были занесены на Марс в результате выброса метеоритов при мощных столкновениях, имев-

ших место в истории Солнечной системы. Более того, современная наука не исключает того, что миллиарды лет назад «космическая зараза» жизни была занесена из космоса и на Землю.

Идея, что жизнь зародилась не на Земле, а была занесена из космоса, была высказана впервые афинским философом Анаксагором. Он ввел термин «панспермия» (в пер. с древнего «семена повсюду»). В 1865 г немец Ганс Рихтер высказал предположение, что первые микроскопические организмы (cosmozoa – космические зачатки) занесены на Землю из космоса, а в качестве транспорта выступали метеориты. В 1908 г. швед Сванте Аррениус предположил, что переносчиками жизни служат не метеориты, а споры, которые перемещаются в космосе под воздействием света. Шриланкиец Чандра Викрамасингх и британец Фред Хойл привели аргументы (см. [6.3]) в пользу того, что живые организмы продолжают поступать из космоса в атмосферу Земли, вследствие чего возникают эпидемии, появляются новые заболевания и создаются условия для макроэволюции. Академик А.Ю. Розанов, также считает, что жизнь на Землю была занесена из космоса.

Возможно, самый большой вопрос, с которым нам придется столкнуться, и который задают не только ученые (см., например, [6.4]) – это что мы будем делать, если обнаружим, что жизнь в настоящее время существует на Марсе или в других мирах? Учитывая трудности в предотвращении загрязнения со стороны исследователей-людей, объявим ли мы эти миры закрытыми для людей, то есть будем использовать роботов? Или мы решим отправить людей, проявляя всю возможную осторожность, и примем вероятность того, что некоторое заражение стоит риска? И что мы будем делать, если обнаружим мир, в котором есть регионы, которые земная жизнь сочтет пригодными для себя или которые можно сделать более пригодными для жизни (терраформирование)? Имеем ли мы право изменять эти миры в соответствии с потребностями планеты? В этой книге такие экзистенциальные вопросы не рассматриваются, мы ограничиваемся только проблемой угроз (рисков).

Оценка рисков, связанных с возможным переносом биологической материи в межпланетном пространстве, является одной из

приоритетных задач исследований, направленных на изучение и парирование космических угроз. Основную роль в международном плане в координации работ по планетарной защите играет КОСПАР (COSPAR – Committee on Space Research). Ряд координирующих организаций работает на национальном уровне в странах, занимающихся космической деятельностью. Например, при Совете по космосу РАН для координации исследований по планетарной биозащите работала специальная рабочая группа.

### **6.1. Факторы риска, связанные с биологическим заражением**

Наличие устойчивых земных форм жизни может стать причиной несанкционированного антропогенного распространения земных организмов на другие небесные тела (прямое заражение, forward contamination). Абсолютно стерилизовать КА практически невозможно. По самым жёстким нормам стерилизации допускается наличие (вынос в космос) некоторого количества микроорганизмов. Более жёсткая стерилизация (например, в результате нагрева до очень высоких температур во многие сотни градусов, или интенсивного гамма-облучения) приводит к нарушению функциональности космических аппаратов или их важных элементов. Такая техногенная панспермия означает опасность заражения других планет земными формами жизни. Это может привести к изменению планетарного биоценоза планеты посещения, если он есть. Помимо возможной опасности для местной биосферы занесение чужих для данной планеты организмов исказит общий «биологический портрет планеты» и, например, результаты исследований, направленных на изучение условий и деталей процесса происхождения жизни, будут искажены. Основной целью планетарной защиты в этом случае является сохранение первозданных природных процессов, предотвращение попадания организмов с Земли.

Опасность для жителей Земли представляет и т. н. обратное загрязнение т. е. инфицирование Земли инопланетными формами жизни, включая возвращаемые биоматериалы (back contamination, также backward contamination). Разновидность обратного загрязнения – возвращение на Землю земных же организмов, вынесенных



ранее в космос и испытывавших воздействие космических факторов. В результате воздействия этих факторов природа организмов может измениться и при возвращении они могут, возможно, представлять опасность для биосферы Земли.

Современная наука не может прогнозировать, каким образом изменятся те земные микроорганизмы, которые сохранились в условиях космоса или другой планеты, как они мутировали. Возможность относительно быстрой изменяемости микроорганизмов при изменении внешних условий доказана в космических экспериментах. Например, исследование, проведенное NASA с помощью кубсата EsAMSat показало, что кишечная палочка, выращенная в космосе, имеет другие свойства из-за изменений в условиях микрогравитации [6.5]. Эти изменения затрудняют проникновение молекул антибиотиков через клеточные мембраны и кишечная палочка, выращенная в космосе, более устойчива к антибиотикам.

Есть множество свидетельств того, что может произойти, когда организмы из регионов Земли, которые были изолированы друг от друга в течение значительных периодов времени, попадают в среду обитания друг друга. Виды, которые ограничены в одной среде, могут процветать (часто бесконтрольно) в другой среде во многом в ущерб первоначальным видам, которые там присутствовали. Микробы из одного региона могут вызывать разрушительные заболевания у организмов, живущих в другом регионе, если у них нет естественного иммунитета, выработанного в результате предыдущего и многократного воздействия. В некотором смысле эта проблема могла бы усугубиться, если бы формы жизни с одной планеты были внедрены в совершенно чуждую экологию другого мира. Учитывая вероятность того, что генетические системы и физиология обоих миров будут действительно чужеродными, заражение маловероятно (но не невозможно).

По-видимому, главный фактор риска – это высокая выживаемость живого в весьма враждебных условиях космоса. Неспециалистов в области космической биологии (в том числе авторов этой книги) удивляет живучесть земных организмов. В этой живучести убеждают, в частности, результаты, полученные в Институте медико-биологических проблем РАН в ходе реализации космичес-

кого эксперимента «Биориск». Целью этого эксперимента являлась оценка возможности выживания микроорганизмов в условиях космического пространства. В одном из экспериментов, длившегося в общей сложности 31 месяц, был взят целый ряд биологических объектов: бактерии, грибы, личинки африканского комара, икра рыб, семена растений, ракообразные эмбрионы, и все эти организмы экспонировались в условия открытого космоса. Результаты эксперимента представлены в виде копии постера на рис 6.1.



Рис. 6.1. Некоторые результаты эксперимента «Биориск» на борту МКС.

Согласно результатам, опубликованным в [6.6], многое из этого разнообразия биообъектов выжило. Погибла икра рыб, но выжили личинки комаров, некоторые семена, бактерии и грибы, некоторые ракообразные. Так что планетарный карантин можно рассматривать и в более широком аспекте, связанном не только с микроорганизмами, но и с тем, что могут сохраняться и другие, более вы-

сокоорганизованные формы живой материи.

Оценки последствий заражения делаются с помощью моделей, примерно такой, как схематичная модель для оценки уровня прямого заражения при посылке автоматического КА к планете, представленная на <https://slidetodoc.com/planetary-protection-at-nasa-overview-and-status-catharine-2/>. Количество  $N_{Xs}$  организмов типа X, которые могли бы выжить на теле планеты, рассчитывается из оценки начального уровня загрязнения  $N_{X0}$  космического аппарата и различных факторов выживания:

$$N_{Xs} = N_{X0} F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 F_6 F_7 , \quad (6.1)$$

где

$F_1$  – количество организмов данного вида относительно  $N_{X0}$ ;

$F_2$  – коэффициент выживаемости при снижении биологической нагрузки (при стерилизации);

$F_3$  – доля выживаемости в полете;

$F_4$  – доля выживаемости при радиационном облучении;

$F_5$  – вероятность столкновения с планетой, включая режимы отказа космического аппарата;

$F_6$  – вероятность того, что организм выживет столкновение;

$F_7$  – доля выживаемости при погребении (внедрении в почву).

Организмы типа X определяются как:

- Тип А: Типичные, распространенные микроорганизмы всех видов (бактерии, грибы и т.д.);
- Тип В: Споры микроорганизмов, которые, как известно, устойчивы к воздействиям (например, высыханию, нагреву, радиации);
- Тип С: Дремлющие микроорганизмы (например, споры), которые особенно устойчивы к высокому уровню радиации;
- Тип D: Редкие, но обладающие высокой устойчивостью к радиации неспоровые микроорганизмы (например, *Deinococcus radiodurans*).

## 6.2. Рекомендации по планетарному карантину

Под планетарной биозащитой (планетарным карантинном) подразумевают комплекс мер, направленных на предотвращение заражения космических тел земными формами жизни, и, наоборот, – на недопущение заноса космических форм жизни на Землю.

Одним из краеугольных камней планетарной защиты является международный «Договор о принципах, регулирующих деятельность государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела», подписанный в 1967 году, в котором говорится, что «государства должны избегать вредного загрязнения космического пространства и небесных тел». За последние полвека планетарная защита нашла отражение в различных стратегиях, отчетах и планах миссий.

COSPAR разработал концепцию планетарного карантина (см. <https://planetaryprotection.nasa.gov/about-categories/>). Эта концепция сводится к следующему: все космические полёты ранжируются на пять категорий в зависимости от биологического интереса к планете-мишени и типа экспедиции:

Категория I: Любая миссия в места, не представляющие непосредственного интереса для исследования химической эволюции и/или происхождения жизни. К таким местам относят, например, Солнце или Меркурий.

Категория II: Любая миссия в места, представляющие непосредственный интерес для исследования химической эволюции и/или происхождения жизни. При этом риск того, что загрязнение с аппарата может поставить под угрозу исследование, крайне мал. Например: Луна, Венера или кометы.

Категория III: Миссия с пролётной траекторией или выход на орбиту в местах, представляющих непосредственный интерес для исследования химической эволюции и/или происхождения жизни. При этом риск того, что загрязнение с аппарата может поставить под угрозу исследование, высок. К таким местам относятся: Марс, Европа, Энцелад. К каждой конкретной миссии могут предъяв-

ляться дополнительные требования, такие как: расчёт траектории смещения, чистое сборочное помещение, снижение биологической нагрузки.

Категория IV: Миссия с использованием зонда, спускаемого аппарата и/или планетохода в местах, представляющих непосредственный интерес для исследования химической эволюции и/или происхождения жизни. К каждой конкретной миссии выдвигаются определённые требования. Так, например, полная стерилизация, если миссия включает в себя поиск внеземной жизни или в ходе миссии планируется посадка или перемещения в регионе, где наземные микроорганизмы могут выжить и развиваться, или где могут присутствовать местные формы жизни. Миссии категории IV подразделяются дополнительно:

- Категория IVa: зонд, спускаемый аппарат или планетоход, в цели которого не входит поиск марсианской жизни. Уровень биологической нагрузки не более 300 микроорганизмов на 1 квадратный метр (но не более 30 тыс. микроорганизмов на весь аппарат).
- Категория IVb: зонд, спускаемый аппарат или планетоход, в цели которого входит поиск жизни. Добавляются дополнительные требования для предотвращения загрязнения образцов.
- Категория IVc: при наличии у зонда, спускаемого аппарата или планетохода целей в специальных областях Марса. (Выделенные COSPAR области Марса, в которых могут легко выжить и распространиться земные организмы, а также велик потенциал существования марсианских форм жизни. К таким местам относятся области, в которых периодически образуется жидкая вода, а также другие благоприятные места для развития жизни, исходя из современного понимания требований к её развитию. Весь аппарат должен быть подвергнут стерилизации с остаточной биологической нагрузкой не более 30 микроорганизмов на 1 м<sup>2</sup>.

Категория V: Отдельная категория, регулирующая миссии в ходе которых планируется возврат образцов с небесных тел на Землю. Категория подразделяется на:

- Категория V (неограниченный возврат): Образцы из мест, где в представлении современной науки нет жизни. Возможность обратного загрязнения ничтожно мала. Никаких особых требований не предъявляется.
- Категория V (ограниченный возврат): В случаях, когда современная наука не может гарантировать отсутствие жизни на целевом небесном теле, выдвигаются дополнительные требования, такие как помещение в карантин образцов, а также любого аппаратного обеспечения, принимавшего участие в миссии.

### **6.3. Методы реализации требований планетарного карантина**

Методы, предназначенные для осуществления мер планетарного карантина, включают стерилизацию КА, а в случае возвращаемых образцов и стерилизацию этих образцов.

Космические аппараты очищаются от микробов несколькими методами: тепловым, химическим, радиационным и плазменным.

#### Тепловой метод (сухой нагрев):

Для обеспечения максимальной стерилизации детали космических кораблей держали в камерах с горячим (110–170°C) сухим газом в течение от нескольких часов (при повышенной температуре) до нескольких дней. Однако повышенные температуры могут привести к серьезным нагрузкам и повреждению чувствительного оборудования. Согласно [6.1] в армейских биологических лабораториях США были проведены исследовательские эксперименты по изучению эффективности применения более низких температур с увеличением времени выдержки. Полученные данные показали, что для нужд NASA достаточно сухого нагрева до температуры 125 °C и выдержки в течение 24 часов.

Постоянно растущая сложность критически важного оборудования и материалов космических аппаратов привела к разработке новых процедур снижения микробиологической активности, а также к изменениям в устоявшихся процессах, таких как термическое снижение микробиологической активности. Современная

рекомендация для обеспечения планетарного карантина – это включение нагрева до 500°C, но на очень короткое время, в течение 0.5 секунд. Ведутся исследования по стерилизации кратковременным (<30 секунд) воздействием тепла при температуре >200°C. Сухой нагрев осуществляется с помощью инфракрасных нагревателей. В исследовании, описанном в [6.7], использовался инфракрасный обогреватель мощностью 6 кВт для определения выживаемости термостойких спор *Bacillus ATCC 29669*.

В [6.4] отмечается, что, хотя основным одобренным NASA методом уничтожения микробов является процесс стерилизации сухим теплом, при использовании таких элементов, как сверхсложная электроника и датчики в современных космических аппаратах, этот процесс сопряжен со значительными материальными трудностями и, таким образом, является нежелательным для инженеров-конструкторов методом снижения биологической нагрузки.

#### Химический метод:

В [6.8] обсуждается применение метода стерилизации парами перекиси водорода (VHP) в качестве альтернативы сухому тепловому уничтожению микроорганизмов. Была проведена серия экспериментов с использованием спор *Geobacillus stearothermophilus* для определения параметров процесса VHP, которые обеспечивали значительное снижение жизнеспособности спор. Технология стерилизации VHP широко используется в медицинской промышленности, но высокие дозы VHP могут ухудшить характеристики бортового оборудования или нарушить совместимость материалов.

В качестве дополнительной меры детали также протирают 70% спиртом или перекисью водорода, чтобы убить оставшихся в живых микробов. Однако эти химикаты нельзя использовать повсеместно, так как они могут повредить некоторые покрытия деталей или оборудования космического аппарата.

В общем, нужно отметить, что использование химикатов также не является на 100% эффективным.

#### Радиационный метод:



Для стерилизации используется ультрафиолетовое (УФ) или гамма-излучение. Детали космического аппарата и его оборудование подвергаются воздействию этих жестких лучей, которые повреждают ДНК микробов и убивают их. На рис. 6.2 (взят из [6.9]) проиллюстрирована эффективность УФ-излучения для стерилизации.

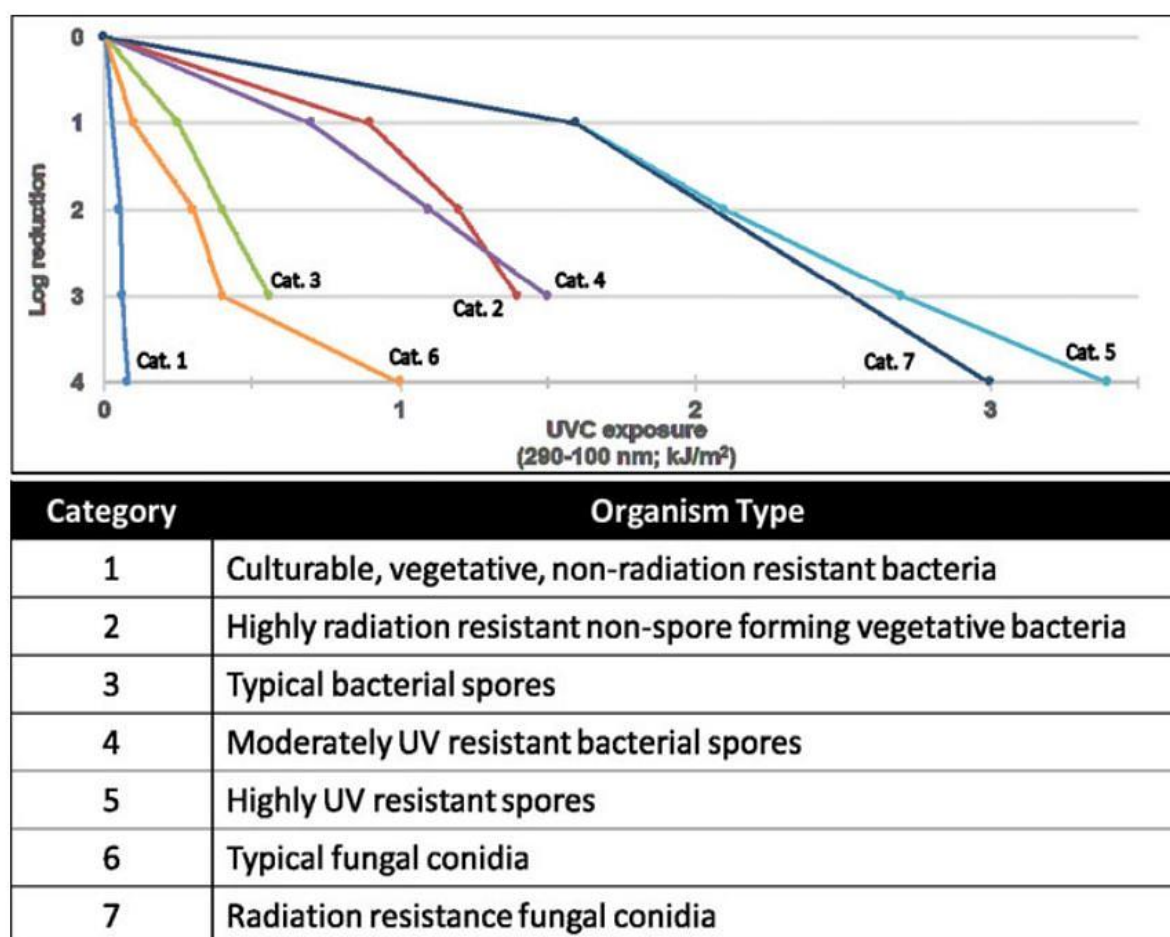


Рис. 6.2. Динамика стерилизации различных микроорганизмов УФ излучением.

Читатель может ознакомиться с конкретным примером радиационной стерилизации гамма-излучением по работе [6.10]. В работе экспериментально обоснованы стерилизующие дозы радиационного воздействия гамма-излучения на микроорганизмы, изолированные из чистых помещений, предназначенных для сборки десантного модуля (ДМ) космического аппарата «ЭкзоМарс». Показано, что среди доминирующих в среде чистых помещений мик-



роорганизмов, есть радиационно резистентные спорообразующие бактерии рода *Bacillus*. Как наиболее эффективное для радиационной стерилизации объемных элементов составных частей ДМ предложено дробное  $\gamma$ -облучение с 2 сторон с поглощенной дозой  $25 \pm 2$  кГр.

#### Плазменная стерилизация:

В ряде работ была продемонстрирована применимость низкотемпературной плазмы ( $30-70^\circ\text{C}$ ), созданной в относительном вакууме или даже при атмосферном давлении в качестве эффективного источника стерилизации (см., например, [6.11]). Теории, касающиеся физических основ стерилизации холодной плазмой, основаны на воздействии активных форм кислорода. Сюда входят синглетный кислород, атомарный кислород, супероксид и озон, которые образуются при наличии молекулярного кислорода ( $\text{O}_2$ ) в плазменном разряде. Холодный плазменный разряд при атмосферном давлении может быть создан с использованием очень простой конфигурации электрода и безвреден для окружающей среды без необходимости использования вакуумных насосов. Плазменная стерилизация также имеет более высокую эффективность стерилизации, чем тепловая или радиационная стерилизация. Плазменная стерилизация позволяет равномерно стерилизовать космические корабли, не повреждая чувствительное оборудование и хрупкие материалы на борту.

И всё-таки единственного идеального метода стерилизации, конечно, не существует. В реальной практике применяют комплекс методов. Для полноты опишем цикл работ по выполнению требований планетарной защиты для модуля, готовившегося к посадке на Марс. В [6.12] представлены основные мероприятия по выполнению требований планетарной защиты на этапах сборки и испытаний разработанного в рамках проекта «ЭкзоМарс» в АО «НПО Лавочкина» десантного модуля (ДМ) на поверхность Марса, а именно стерилизация и очистка его составных частей, сборка в чистых помещениях, применение спецодежды, осуществление микробиологического контроля и т. д. Для экспедиций категории IVa к которой относится ДМ, плотность микробиологического загрязнения поверхности на момент окончания сборки не

должна превышать 300 бактериальных спор/м<sup>2</sup>, а общая поверхностная бионагрузка ДМ перед пуском не должна превышать  $3 \cdot 10^5$  бактериальных спор. Сложный и длительный процесс создания ДМ делится на приведенные ниже этапы, имеющие свои особенности по выполнению требований планетарной защиты. Перечислим эти этапы согласно [6.12]:

1. Сборка составных частей (устройств, аппаратуры и отдельных конструкций) ДМ. Сборка производилась в чистом помещении не хуже класса ISO8 (ISO8 – один из классов чистоты по международному стандарту) с последующим обеззараживанием различными способами – очисткой и стерилизацией:

1.1. Составные части из металлических и радиационно стойких полимерных материалов подвергались радиационной стерилизации (с дозой до 25 кГр) или поверхностной стерилизацией ультрафиолетом.

1.2. Большая часть служебной аппаратуры стерилизовалась сухим теплом в двойной микробиологически непроницаемой упаковке, остальные служебные приборы протирались спиртом в процессе сборки в чистом помещении.

1.3. Научные приборы подвергались газовой стерилизации с последующей дегазацией.

1.4. Подсистемы спуска и посадки ДМ (лобовой экран и задний кожух) стерилизовались ультрафиолетовым облучением.

2. Сборка ДМ (в АО «НПО Лавочкина»). Сборка проводилась в чистом помещении класса ISO8, контролируемом по микробиологической чистоте (применялись УФ-облучение и уборка с дезинфектантом, строго выполнялась процедура доступа с переодеванием в спецодежду класса ISO7). В процессе работ производились УФ-облучение поверхностей КА и очистка спиртом при постоянном микробиологическом контроле.

3. Окончательная сборка летного образца ДМ и интеграция его с марсоходом (TASinI, Италия). Сборка производится в чистом помещении класса ISO7 (уборка с дезинфектантом, строгое выполнение процедуры доступа через шлюз с переодеванием в спецодежду кл. ISO7). Очистка спиртом при постоянном микробиологическом контроле.

4. Испытания спускаемого космического аппарата (СКА). СКА находился в чистой палатке класса ISO7, перемещался на испытательные стенды – в помещения класса ISO8. При превышении поверхностной бионагрузки (по данным микробиологического контроля) проводилась повторная очистка спиртом.

Особенное внимание вызывает вопрос планетарной биозащиты при реализации пилотируемых миссий на другие тела Солнечной системы. Избавить человека от микроорганизмов невозможно, наш микробиом – зоопарк микроорганизмов, которые живут внутри и снаружи нас, – критически важен для нормального физиологического функционирования. Таким образом, посылая человека, скажем на Марс, мы отправляем в полет огромный набор микроорганизмов. Но уже сейчас разрабатываются способы свести это к управляемой проблеме. Например, NASA разрабатывает усовершенствованные концепции скафандров. Они являются отделяемой частью марсохода или космического корабля. Астронавты забираются в них и выходят из них – вместо того, чтобы надевать скафандр внутри космического корабля, как это делалось все последние десятилетия.

#### *Литература к разделу*

- 6.1. Meltzer M. When biospheres collide : a history of NASA's planetary protection, NASA SP ; 2011-4234, з. 522, 2011.
- 6.2. Alberto G., Fairén A. G., Schulze-Makuch D. The overprotection of Mars // Nature Geoscience, volume 6, p. 510–511, 2013.
- 6.3. Hoyle F.; Wickramasinghe C.; Watson J. Viruses from Space and Related Matters. □ University College Cardiff Press, 1986.
- 6.4. Cowing K., SpaceRef, April 11, 2013  
(<https://astrobiology.com/2013/04/planetary-protection-a-work-in-progress.html>)
- 6.5. Michael R. Padgen M.R., Matthew P. Lera M.P., Macarena et al. EcAM-Sat spaceflight measurements of the role of  $\sigma$ s in antibiotic resistance of stationary phase Escherichia coli in microgravity // Life Sciences in Space Research, Volume 24, p. 18-24, 2020.
- 6.6. Novikova N.D., Polikarpov N.A., Deshevaya E.A., Levenskikh M.A., Alekseev V.P., Okuda T., Sugimoto M., Gusev O.A., Sychev V.N.,

- Grigoriev A.I., Survival of dormant organisms after long-term exposure to the space environment // *Acta Astronautica*, V 68, P. 1574-1580, 2011.
- 6.7. Dean Z., ; Klonicki E.; DiNicola M., et al. Establishing spore time-to-sterilization at temperatures over 200 °C, 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022. Online at <https://www.cosparathens2022.org/>. Abstract PPP.3-0011-22.
- 6.8. Chen F., Chung S., Barengoltz J., Vapor hydrogen peroxide sterilization certification, 38th COSPAR Scientific Assembly. Held 18-15 July 2010, in Bremen, Germany, p.4., 2010.
- 6.9. Craven E., Winters M., Smith A.L, et al. Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars Sample Return: conclusions from the Sterilization Working Group // *International Journal of Astrobiology*, Volume 20, Issue 1, pp. 1-28, 2021.
- 6.10. Дешевая Е.А., Хамидуллина Н.М., Часовских А.В., Харин С.А., Новикова Н.Д., Сычев В.Н., Возможности радиационной стерилизации при выполнении миссии «ЭкзоМарс» // *Авиакосмическая и экологическая медицина* 2020 Т. 54 № 5, 2020.
- 6.11. Gandhiraman R. P., Beeler D., Meyyappan M., Khare B. N, Low temperature atmospheric pressure plasma sterilization shower, International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions, held October 10-12, 2012 in Greenbelt, Maryland. LPI Contribution No. 1683, p.1058, 2012.
- 6.12. Захаренко Д.В., Особенности выполнения требований планетарной защиты на различных этапах сборки марсианского десантного модуля // XLVII Академические чтения по космонавтике (Королевские чтения), 2022.

## **7. ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ (КЛИМАТИЧЕСКАЯ КАТАСТРОФА)**

### **7.1. Глобальное потепление: основные факты**

С середины 1970-х годов в научной, а немного позже и в общественной среде шли бурные дискуссии о так называемом глобальном потеплении. Так называют долговременное устойчивое повышение средней температуры на Земле.

Сегодня уверенность в существовании этого процесса есть – с 1900 г. по настоящее время средняя температура на поверхности Земли выросла на  $\sim 0.9^{\circ}\text{C}$ . Споры переместились на вопросы последствий глобального потепления и методов противодействия ему. Сложился консенсус и по вопросам о причинах сегодняшнего глобального потепления – оно вызвано усилением парникового эффекта на Земле, причиной которого является увеличение концентрации углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в атмосфере. Сегодня концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе самая высокая за очень большой период времени. Приведем основные факты по этим вопросам.

Регулярные и систематические метеорологические наблюдения в различных точках Земли (изначально – в крупных городах) начались примерно 150–200 лет назад. На самом деле распоряжения о ведении регулярных записей о погоде правителями различных государств издавались и ранее. В России, например, всё началось при царе Алексее Михайловиче. В 1650 г. его указом в Московском кремле были начаты ежедневные визуальные наблюдения за погодой. Записи о заносились в «Дневальные записки Приказа тайных дел». Благодаря регулярному характеру ведения метеорологических записей можно составить представление о числе солнечных дней и дней с осадками, числе гроз, случаях выпадения града, ночах с обильными росами, а также проследить особенности некоторых метеорологических явлений в отдельные сезоны за

целый ряд лет. Это решение было в 1722 г. подтверждено именным указом Петра I. Так начались регулярные наблюдения за погодой.

Метеорология стала инструментальной наукой в XVII в., когда были изобретены все основные метеорологические приборы: термометр, барометр, дождемер, анемометр и гигрометр. Флюгер был изобретен ранее. Сегодня на Земле действуют тысячи метеорологических пунктов, которые фиксируют не только температуру, давление, влажность и скорость ветра, но и многие другие параметры – облачность, химический состав воздуха и прочее, включая состояние магнитного поля Земли и космическую погоду (см. раздел 3). Существуют косвенные методы определения температуры и некоторых других параметров в прошлом. К этим методам относится дендрохронология, исследование коралловых рифов, конкреций, исследование отложений на дне водоемов и кернов льда в ледниках (в первую очередь – в Антарктиде), а также палеонтологические методы.

Вернемся к фактам о глобальном потеплении. На рисунке 7.1 показано изменение средней температуры поверхности Земли с 1880 г. На рисунке 7.2 показано изменение температуры на большем интервале – с начала нашей эры. Данные для периода времени более 200 лет назад получены косвенными методами.

Заметим, что разность температур «теплого средневековья» и «малого ледникового периода» составляет около  $0.25^{\circ}\text{C}$ , а потепление за XX–XXI века в четыре раза больше и оно идёт очень быстро. Похоже, что потепление, зарегистрированное в XX веке началось не в начале века, а раньше, с началом индустриальной эры (условно – 1600 г.).

На рисунке 7.3 показана аппроксимация данных с рисунков 7.1 и 7.2 начиная с 1600 г. За этот период повышение температуры составляет  $1.4^{\circ}\text{C}$  (из которых  $0.9^{\circ}\text{C}$  приходится на XX век). До XVII века глобального потепления, по-видимому, не было.

С высокой вероятностью можно говорить о том, что нынешнее глобальное потепление вызвано быстрым увеличением концентрации парниковых газов (в первую очередь  $\text{CO}_2$ ) в атмосфере

Земли <sup>4</sup>.



Рис. 7.1. Повышение средней температуры поверхности Земли с 1880 г. Точки, соединенные линией, – средняя годовая температура, сплошная линия – сглаженная по 5 годам зависимость.

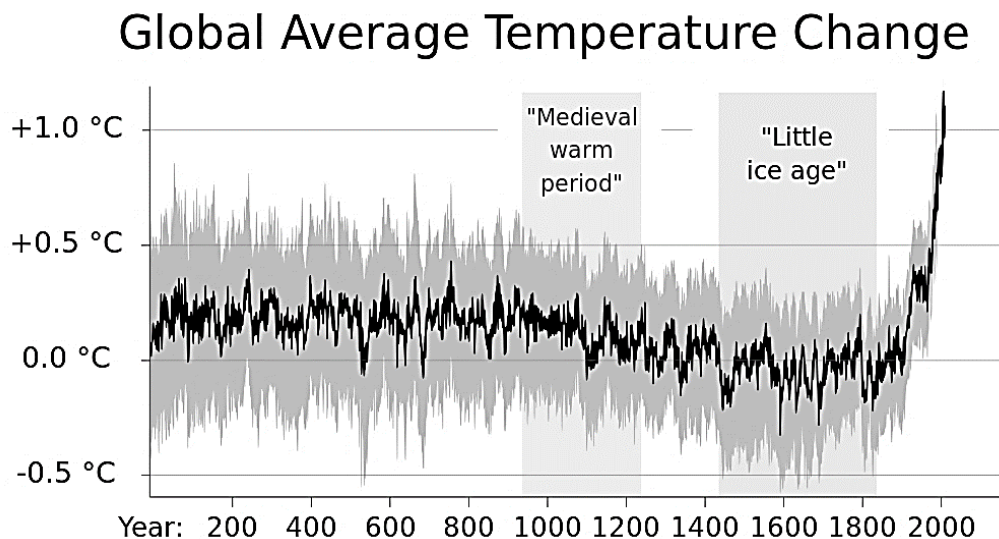


Рис. 7.2. Изменение температуры за последние 2000 лет. Чёрная линия – среднее значение температуры, серая область – возможные отклонения. Показаны «малый ледниковый период» (1400–1800 гг.) и «теплое средневековье» (950–1250 гг.)

<sup>4</sup> Киотский протокол относит к парниковым газам: углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), гидрофторуглероды, перфторуглероды и гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ).



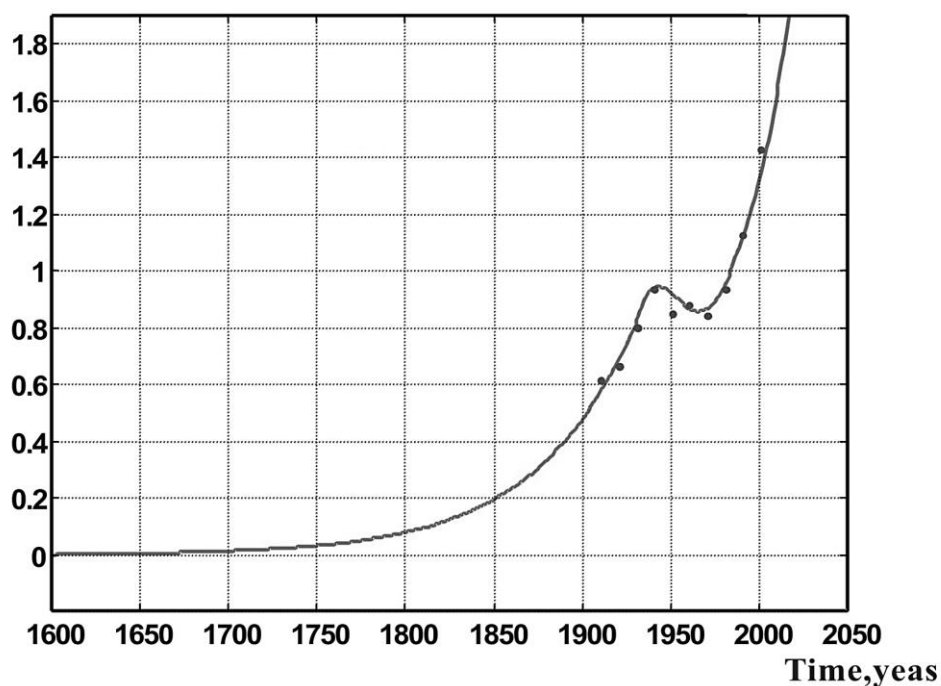


Рис. 7.3. Изменение температуры с 1600 г.

На рисунке 7.4 показано изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли за последние 1000 лет по данным исследований в 4-х местах на Земле и одной метеорологической обсерватории (Law Dome). До 1800 г. концентрация  $\text{CO}_2$  держалась на уровне

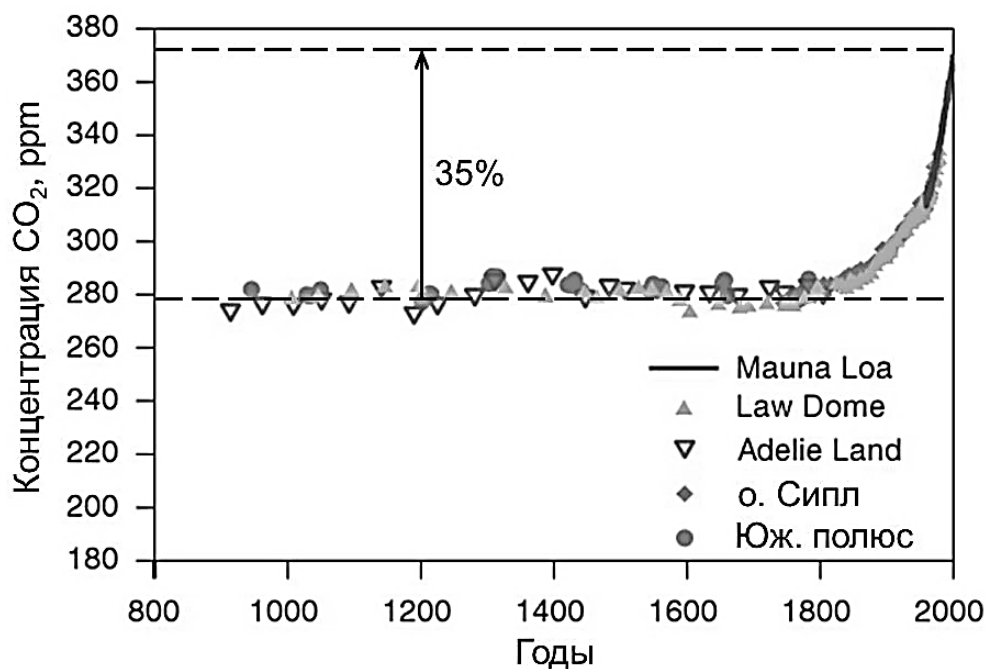


Рис. 7.4. Изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли за 1000 лет.



лась на уровне 280 ppm и практически не меняясь. За последние два века концентрация  $\text{CO}_2$  возросла на 35% до 370 ppm, причем ее рост происходил в ускоряющемся темпе.

Следует заметить, что превышение концентрации парниковых газов в разы произошло за почти миллион лет (см. Рис. 7.5). Однако в ещё более раннюю эпоху концентрация  $\text{CO}_2$  была в несколько раз выше, чем сегодня (см. Рис. 7.6), причем эта эпоха – не самое глубокое прошлое Земли – всего 60 млн лет назад (эпоха

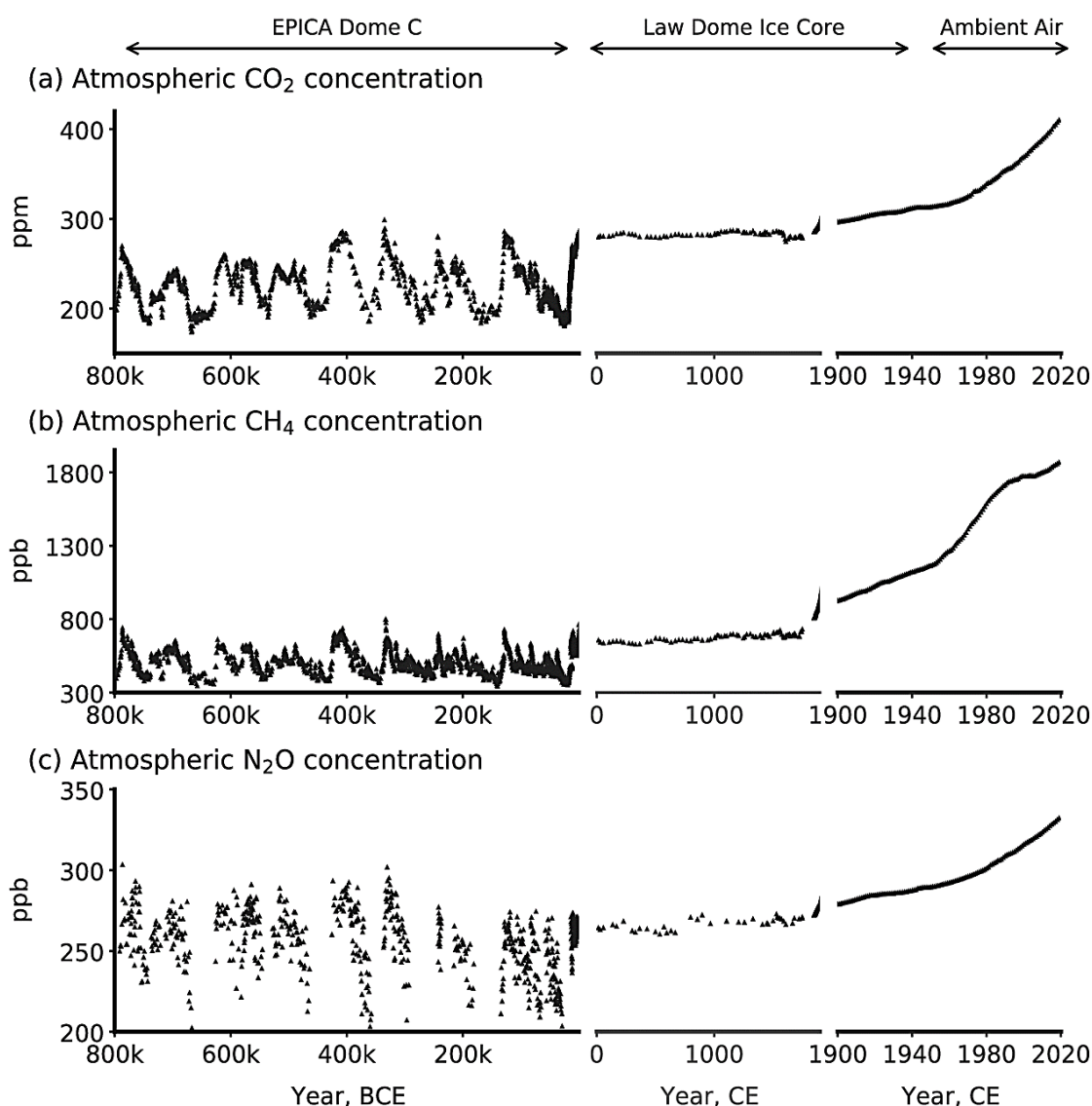


Рис. 7.5. Изменение концентраций углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере Земли за 800 тыс. лет.

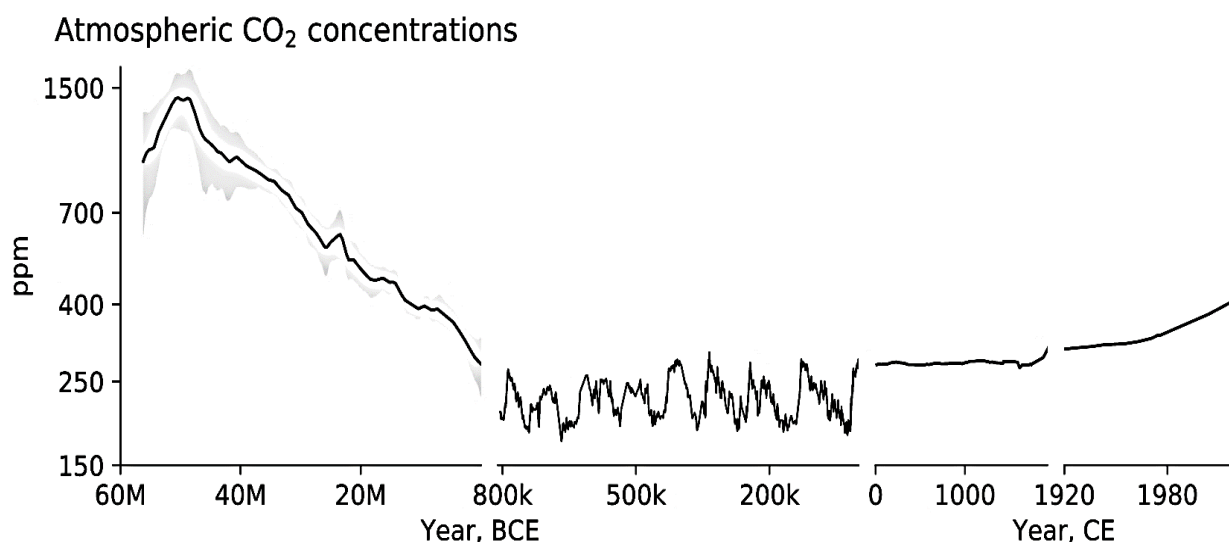


Рис. 7.6. Изменение концентраций углекислого газа в атмосфере Земли за 60 млн лет.

вымирания динозавров).

Пристальное внимание к глобальному потеплению вызвано тем, что, если оно будет продолжаться, Земле грозит ряд неприятных последствий. К ним относятся:

- таяние ледников;
- повышение уровня моря;
- изменение циркуляции в океанах;
- региональные изменения климата и количества осадков, усиление жары;
- более частые экстремальные погодные явления;
- необратимые изменения в экосистемах:
  - более раннее цветение растений;
  - расширение пустынь;
  - усиление лесных пожаров;
  - вымирание животных и растений;
- изменение регионов болезней и появление новых патогенов;
- снижение урожайности растений.

Опасные последствия глобального потепления будут более подробно рассмотрены ниже в этой главе. Очень много информации по всем аспектам глобального потепления можно найти в отчетах

IPCC<sup>5</sup>. IPCC каждые 5-7 лет издает подробнейшие отчеты: последний и шестой по счету [7.1] был опубликован в 2021 г., предыдущий, 5-й [7.2] – в 2014 г. Это действительно всеобъемлющие доклады, объем 6-го доклада IPCC составляет 2400 страниц.

## **7.2. Энергетический баланс Земли. Дисбаланс на поверхности Земли**

Температура на поверхности Земли определяется процессами обмена энергией между различными ее частями (сушей, океанами, ледниками, атмосферой, а в ней – облачностью). Основных источников энергии в этом кругообороте – два: основной – излучение Солнца и существенно меньший (примерно в 5000 раз) – эндогенное (внутреннее) тепло Земли. Оба источника энергии очень стабильны на коротких временах (тысячи лет), светимость Солнца меняется на 0.1% в пределах года и до 0.5% за 11-летний солнечный цикл. На больших временах светимость Солнца растет на 1% за 110 млн лет, это связано с его ядерной эволюцией, как звезды главной последовательности. На момент образования Солнечной системы светимость Солнца составляла около 70% от нынешней.

Поток эндогенного тепла складывается из нескольких источников:

- распад долгоживущих радиоактивных изотопов ( $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ), их времена полураспада от 700 млн до 14 млрд лет;
- гравитационная дифференциация (стратификация) вещества;
- приливное трение;
- трение между более быстро вращающимся ядром и мантией;
- метаморфизм и фазовые переходы в веществе мантии и ядра;
- общее остывание внутренних частей планеты.

На внутренние источники кроме остывания ядра и мантии приходится примерно 60% потока эндогенного тепла, причем основным из них является радиоактивный распад. Остальные 40% обеспечиваются за счет остывания ядра и мантии. Схема энергообмена показана на рисунке 7.7.

---

<sup>5</sup> IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Межправительственная группа экспертов по изменению климата).

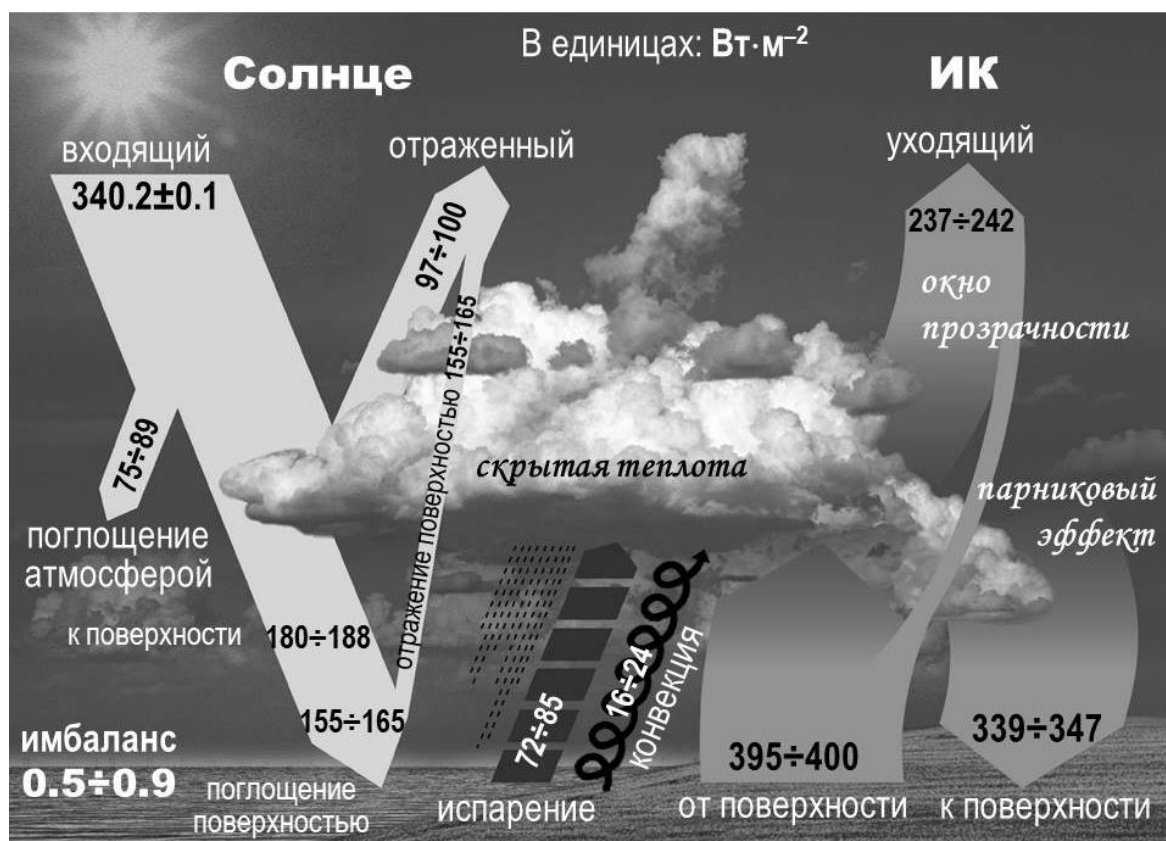


Рис. 7.7. Усредненный энергетический бюджет Земли из [7.1].

Энергообмен на ней можно условно разделить на три канала:

- перенос излучения Солнца, максимум которого приходится на длину волны  $\lambda = 0.5$  мкм – область со светлыми стрелками в левой части рисунка;
- перенос собственного теплового излучения Земли в среднем инфракрасном диапазоне на длине волны примерно  $\lambda \approx 10$  мкм – более тёмные стрелки в правой части рисунка;
- испарение воды и конвекция в нижних слоях атмосферы – тёмные прерывистая и спиральная стрелки.

На рисунке 7.8 показана другая схема энергообмена Земли, полученная немного ранее другими авторами и по другим данным измерений. Сравнение рисунков 7.7 и 7.8 позволяет судить о прогрессе в уточнении параметров энергетического баланса Земли и о систематических ошибках в нём.

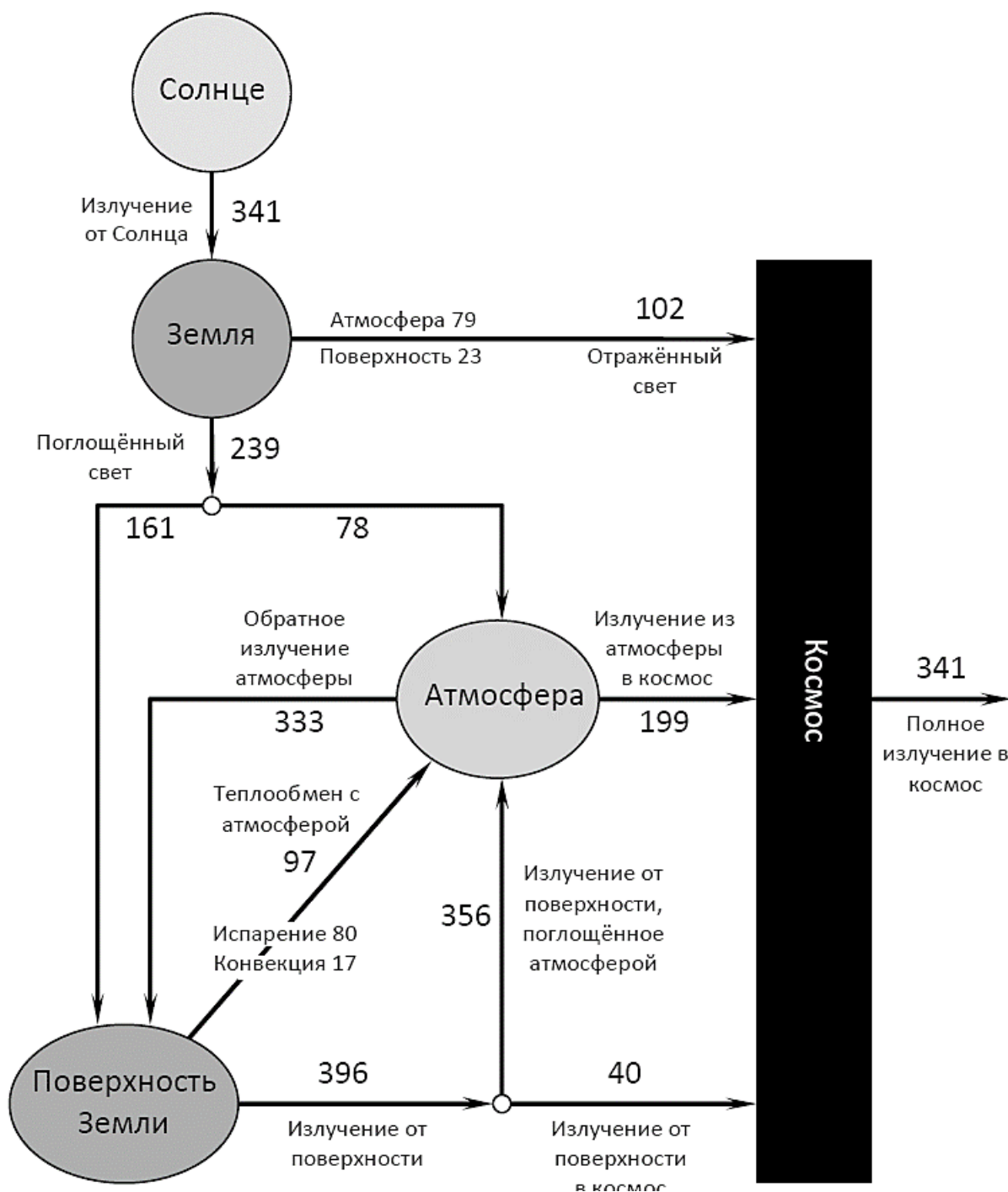


Рис. 7.8. Тепловой баланс Земли за 2000–2004 гг. из [7.3]. Числа – средняя по поверхности Земли и по времени, мощность в  $\text{Вт/м}^2$ .

Значения потоков на рисунке 7.7 указаны с погрешностями. Легко заметить, что самым точным значением, является входящий поток излучения от Солнца, падающий на атмосферу Земли из космоса. Он равен  $W_{\odot}=340.2\pm0.1 \text{ Вт/м}^2$ . Это значение заметно отлича-

ется от солнечной постоянной, применяемой астрономами, которая определяется как суммарная мощность солнечного излучения, проходящего через единицу площади (квадратный метр), ориентированной перпендикулярно потоку солнечных лучей, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. В 1990-х годах для солнечной постоянной было получено значение  $S_{\odot}=1365.4\pm 1.3$  Вт/м<sup>2</sup>, в 2008 г., в минимуме солнечной активности –  $S_{\odot}=1360.8\pm 0.5$  Вт/м<sup>2</sup> (это значение считается самым точным). Солнечная постоянная слегка меняется в пределах  $S_{\odot}=1360\text{--}1366$  Вт/м<sup>2</sup>, эти изменения коррелируют с 11-летним солнечным циклом.

Значения на рисунках 7.7 и 7.8 осреднены по поверхности Земли. Солнце всегда освещает половину Земли, площадь освещенной поверхности, в проекции на плоскость перпендикулярную направлению на Солнце, равна  $\pi(R_E+h_a)^2$ , здесь  $R_E$  – радиус Земли, а  $h_a$  – высота слоя атмосферы, которая поглощает излучение Солнца, причём  $h_a \ll R_E$ . Площадь поверхности Земли, по которой производится осреднение потоков энергии, равна  $\pi R_E^2$  поэтому  $W_{\odot} = S_{\odot}/4$ . Поток эндогенного тепла на рисунках 7.7 и 7.8 не указан, поскольку его средняя величина составляет  $W_{\odot}=87\pm 2$  мВт/м<sup>2</sup>, этой величиной можно пренебречь на фоне погрешностей потоков энергии, показанных на рисунках.

Если бы Земля находилась в энергетическом равновесии, то полный поток энергии, приходящий на Землю от Солнца, должен быть равен потоку энергии, уходящей от неё в космос. Также все потоки энергии, приходящие на сушу, океан, атмосферу должны равняться покидающим их потокам энергии. Величины потоков энергии позволяют определить температуры, соответственно, суши, океана и атмосферы. В равновесии температуры будут постоянны.

При нарушении равновесия потоки энергии не будут сбалансированы. Если приток энергии к какой-либо части Земли будет превышать ее отток, температура этой части будет повышаться, в противном случае – понижаться.

К глобальному потеплению относится часть потоков энергии, изображенных на рисунке 7.7, которые приходят на поверхность

Земли и исходят от неё. К поверхности Земли относится суша, океаны и нижние слои атмосферы. Схема энергетического баланса поверхности Земли показана на рисунке 7.9.

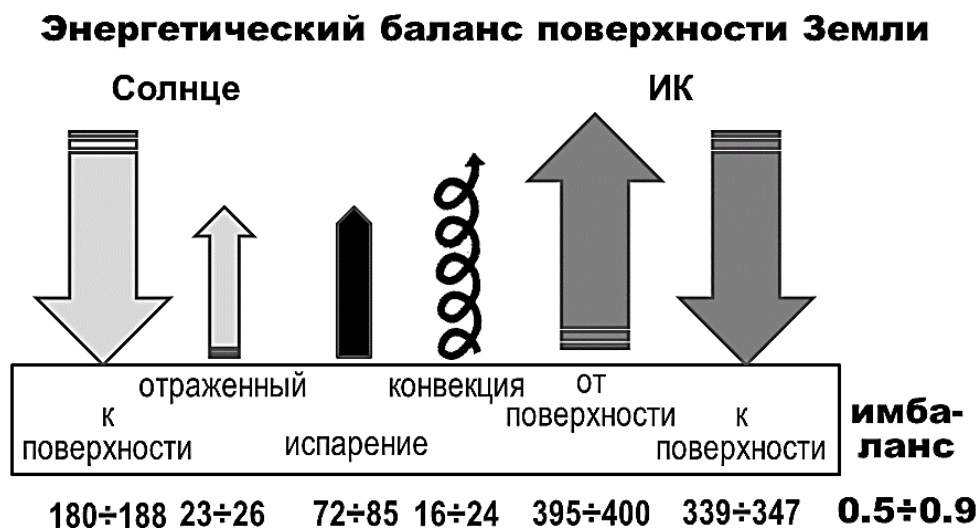


Рис. 7.9. Усредненный энергетический баланс поверхности Земли.

Имбаланс энергии на поверхности Земли согласно данным 6-го отчета ИРСС [7.1] составляет  $+0.7 \pm 0.2$  Вт/м<sup>2</sup>. Следует заметить, величины потоков энергии в схеме 7.9 постоянно уточняются, всего 10 лет назад, в предыдущем 5-м отчете ИРСС, величина имбаланса была практически незначимой  $+0.6 \pm 17$  Вт/м<sup>2</sup>.

### 7.3. Парниковый эффект на Земле сегодня

Атмосфера планеты влияет на температуру её поверхности. Если температура повышается по сравнению с эффективной температурой, которая была бы на планете при отсутствии атмосферы, это влияние называют парниковым эффектом.

#### 7.3.1. Планета без атмосферы и эффективная температура поверхности

Рассмотрим безатмосферную планету на расстоянии  $d$  от Солнца. Поток излучения на орбите планеты будет составлять

$$F = \frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} ,$$

где  $L_{\odot}$  – светимость Солнца.

Энергия солнечного излучения, поглощаемая поверхностью планеты за единицу времени, равна

$$W_+ = F \cdot (1 - A) \cdot \pi R^2 = (1 - A) \frac{R^2}{4d^2} L_{\odot} , \quad (7.1)$$

где  $R$  – радиус планеты,  $A$  – геометрическое альbedo ее поверхности.

Поглощенная энергия нагревает поверхность планеты до некоторой температуры  $T$ , и поверхность начинает испускать тепловое излучение. Температура поверхности планеты считается одинаковой во всех её точках, это соответствует определению эффективной температуры. Мощность теплового излучения поверхности равна

$$W_- = 4\pi R^2 \cdot \sigma_B T^4 , \quad (7.2)$$

где  $\sigma_B$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Эффективная температура  $T_{\text{eff}}$  поверхности достигается при равенстве потоков поглощаемой и испускаемой планетой энергии. Отсюда получаем

$$T_{\text{eff}} = \sqrt[4]{(1 - A) \frac{L_{\odot}}{16\pi \cdot \sigma_B d^2}} . \quad (7.3)$$

Эффективная температура поверхности планеты не зависит от её размеров и меняется обратно пропорционально квадратному корню расстояния от Солнца.

Если подставить значения, соответствующие Земле:  $A = 0.30$ ,  $d = 1.5 \cdot 10^{13}$  см,  $L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{33}$  эрг/с,  $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-5}$  эрг/(сек·см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), получим следующую величину эффективной температуры Земли



$$T_{\text{eff},\oplus} = 254 \text{ K} \quad \text{или} \quad -19^{\circ}\text{C}.$$

Реальная температура поверхности Земли равна  $+14^{\circ}\text{C}$  или 287 К, то есть величина парникового эффекта равна  $\Delta T_{\text{парн}} = 33^{\circ}\text{C}$ .

### 7.3.2. Задача о садовом парнике

#### Задача №1. Условия.

Пусть на поверхность Земли по нормали падает поток излучения  $F_+$  от Солнца. Альбедо Земли в видимом диапазоне равно  $A$ , в инфракрасном диапазоне земля чёрная. Передача энергии от поверхности Земли внутрь за счет теплопроводности отсутствует так же как и за счет теплопроводности и конвекции в воздухе над поверхностью.

Над землёй (здесь – над грунтом) на некоторой высоте  $h$  установлена идеальная пленка:

- она полностью прозрачная для падающего излучения;
- полностью поглощает тепловое излучение, испускаемое поверхностью земли;
- пленка бесконечно тонкая – температуры обеих ее поверхностей одинаковы.

Необходимо найти температуру поверхности земли  $T_{\oplus}$  и температуру пленки  $T_1$ .

#### Решение.

Внешний поток излучения  $F_+$  свободно проходит сквозь пленку, достигает земли. Одна часть потока величиной  $AF_+$  отражается от земли, проходит сквозь пленку с внутренней стороны и рассеивается в космосе. Остальная часть  $(1-A)F_+$  поглощается землёй, поверхность земли нагревается и излучает. Это излучение полностью поглощается пленкой. Пленка нагревается и также излучает. Так как температуры обеих сторон пленки одинаковы, то половина излучения испускается наружу, а половина – внутрь, в сторону земли. Излучение пленки, испущенное внутрь, поглощается поверхностью земли (так же как и поток внешнего излучения  $F_+$ ) дополнительно повышает ее температуру и увеличивает поток излучения, испускаемого поверхностью земли.

Излучение пленки, испущенное наружу, свободно уходит в космос.

В равновесном состоянии поток излучения, покидающий систему  $F_-$  должен равняться потоку, поглощенному землёй. Поток теплового излучения, покидающий систему, создается внешней поверхностью пленки и подчиняется закону Стефана-Больцмана

$$F_- = (1 - A)F_+ = \sigma_B T_1^4$$

а температура пленки равна

$$T_1 = \sqrt[4]{(1 - A) \frac{F_+}{\sigma_B}} \quad ..$$

Такой же поток, испускается внутренней поверхностью пленки в сторону земли. Таким образом, на поверхность земли падает поток излучения (поглощаемая часть потока Солнца + поток от пленки) равный

$$F_{\oplus} = 2(1 - A)F_+$$

Энергия этого излучения поглощается поверхностью земли, нагревает ее до температуры  $T_{\oplus}$ . Тепловое излучение земли также подчиняется закону Стефана-Больцмана, оно полностью испускается наружу, в сторону пленки. Температура поверхности земли будет равна

$$T_{\oplus} = \sqrt[4]{2(1 - A) \frac{F_+}{\sigma_B}} = \sqrt[4]{2} T_1$$

Результат не зависит от высоты  $h$ , на которой пленка установлена над землёй.

При тех же условия поверхность парника имела бы эффективную температуру  $T_{\text{eff}} = T_1$  и, соответственно,

$$\Delta T_{\text{парн}} = (\sqrt[4]{2} - 1)T_1 \approx 0.189T_1$$

Можно ли сделать температуру поверхности в парнике ещё выше?  
Ответ – да.

### Задача №2. Условия.

Условия этой задачи во всем совпадают с условиями задачи №1, но над землёй установлена не одна, а несколько пленок, таких же, как в задаче №1. Число пленок равно  $N$ , они расположены на разных высотах и не касаются друг друга.

Необходимо найти температуру поверхности земли  $T_{\oplus}$ .

### Решение.

Внешний поток излучения  $F_+$  свободно проходит сквозь все слои пленки и достигает земли. Часть потока, величиной  $AF_+$ , отражается от земли, проходит сквозь пленки изнутри и рассеивается в космосе. Остальная часть  $(1-A)F_+$  поглощается землёй, поверхность земли нагревается и излучает. Это излучение полностью поглощается ближайшей к земле пленкой.

Ближайшая к земле пленка нагревается и также излучает. Так как температуры обеих сторон пленки одинаковы, то половина излучения испускается наружу, а половина – внутрь, в сторону земли. Излучение пленки, испущенное внутрь, поглощается поверхностью земли (также как и часть потока солнечного излучения  $(1-A)F_+$ ). Дополнительно повышает ее температуру и увеличивает поток излучения, испускаемого поверхностью земли. Излучение внешней стороны ближайшей к земле пленки, поглощается следующей пленкой.

Так происходит со всеми пленками за исключением последней – самой дальней от земли, у нее излучение ее внешней поверхности свободно покидает систему.

Занумеруем пленки снаружи внутрь: каждую пленку будем обозначать индексом  $i$ , самая дальняя от земли пленка будет иметь номер 1, самая ближняя –  $N$ . Также введем величину  $F_i$  – поток излучения, испускаемый одной поверхностью  $i$ -й пленки (внешней или внутренней).

Тогда для каждой пленки можем записать уравнения баланса энергии

$$\begin{aligned}
F_2 &= 2F_1 && \text{для } i = 1 \\
F_{i-1} + F_{i+1} &= 2F_i && \text{для } 1 < i < N \\
F_{N-1} + F_{\oplus} &= 2F_N && \text{для } i = N \\
F_{\oplus} &= F_N + (1 - A)F_{\odot} && \text{для земли}
\end{aligned} \tag{7.4}$$

Если номер пленки  $1 < i < N$ , то выше и ниже пленки натянуты другие пленки. Она поглощает излучение, испущенное обращенными к ней поверхностями двух ее соседей, поглощает его и поровну переизлучает своими двумя поверхностями в сторону этих пленок. Самая дальняя от поверхности пленка получает излучение только от внутренней соседки. Для самой ближней к земле пленки роль источником излучения с внутренней стороны является поверхность земли.

В равновесном состоянии поток излучения, покидающий систему  $F_-$ , должен равняться поглощенной части потока солнечного излучения

$$F_- = (1 - A)F_+,$$

он испускается внешней поверхностью пленки номер 1, следовательно,

$$F_1 = F_- = (1 - A)F_+$$

Прямой подстановкой легко проверить, что решением уравнения (7.4) является

$$F_i = i(1 - A)F_+, \quad F_{\oplus} = (N + 1)(1 - A)F_+$$

Поскольку излучение, испускаемое землёй и пленками, тепловое, то можем найти их температуры из закона Стефана-Больцмана

$$\begin{aligned}
T_i &= \sqrt[4]{i \cdot (1 - A) \frac{F_{\oplus}}{\sigma_B}} && i = 1, 2, 3, \dots, N \\
T_{\oplus} &= \sqrt[4]{(N + 1) \cdot (1 - A) \frac{F_{\oplus}}{\sigma_B}} && \tag{7.5}
\end{aligned}$$

При  $N = 1$  полученное решение совпадает с решением задачи № 1.

Таким образом, температура поверхности земли под парником растет как  $\sqrt[4]{N + 1}$ . Теоретически можно достичь сколь угодно высокой ее температуры. На самом деле этого, конечно, не произойдет – с ростом температуры внутри парника испускаемое землёй и пленками излучение будет становиться всё более коротковолновым, приближаясь к диапазону излучения Солнца, а его пленки, по условию задачи, должны пропускать, – это приведет к прекращению роста температуры с увеличением числа слоев пленок.

### 7.3.3. Парниковый эффект на Земле

Парниковый эффект на Земле обусловлен различной прозрачностью её атмосферы в видимом и дальнем инфракрасном диапазонах. На диапазон длин волн 400–1500 нм в видимом свете и ближнем инфракрасном диапазоне приходится 75% энергии солнечного излучения. В этом диапазоне большинство газов атмосферы не поглощают излучение. Рэлеевское рассеяние на молекулах газов и рассеяние на атмосферных аэрозолях не препятствуют проникновению излучения в глубины атмосферы и достижению поверхности планеты в указанном диапазоне длин волн.

Солнечный свет поглощается поверхностью планеты и её атмосферой и разогревает их. Атмосфера практически полностью поглощает излучение в ультрафиолетовом и среднем и дальнем инфракрасных диапазонах. Нагретая поверхность и атмосфера излучают в дальнем инфракрасном диапазоне. Для Земли с эффективной температурой  $T_{\text{eff}} \approx 300$  К. 75% теплового излучения испускается в диапазоне 8–28 мкм.

Три главных составляющих воздуха – молекулярные азот ( $\text{N}_2$ ) и кислород ( $\text{O}_2$ ) и атомарный аргон ( $\text{Ar}$ ) являются диатермичными газами – они практически прозрачны для теплового излучения. Диатермичными являются газы с одно- и двухатомными молекулами. За поглощение в инфракрасной области спектра отвечают так называемые парниковые газы: водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ), углекислый газ

(CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), озон (O<sub>3</sub>), оксид азота (N<sub>2</sub>O) (см. Рис. 7.10).

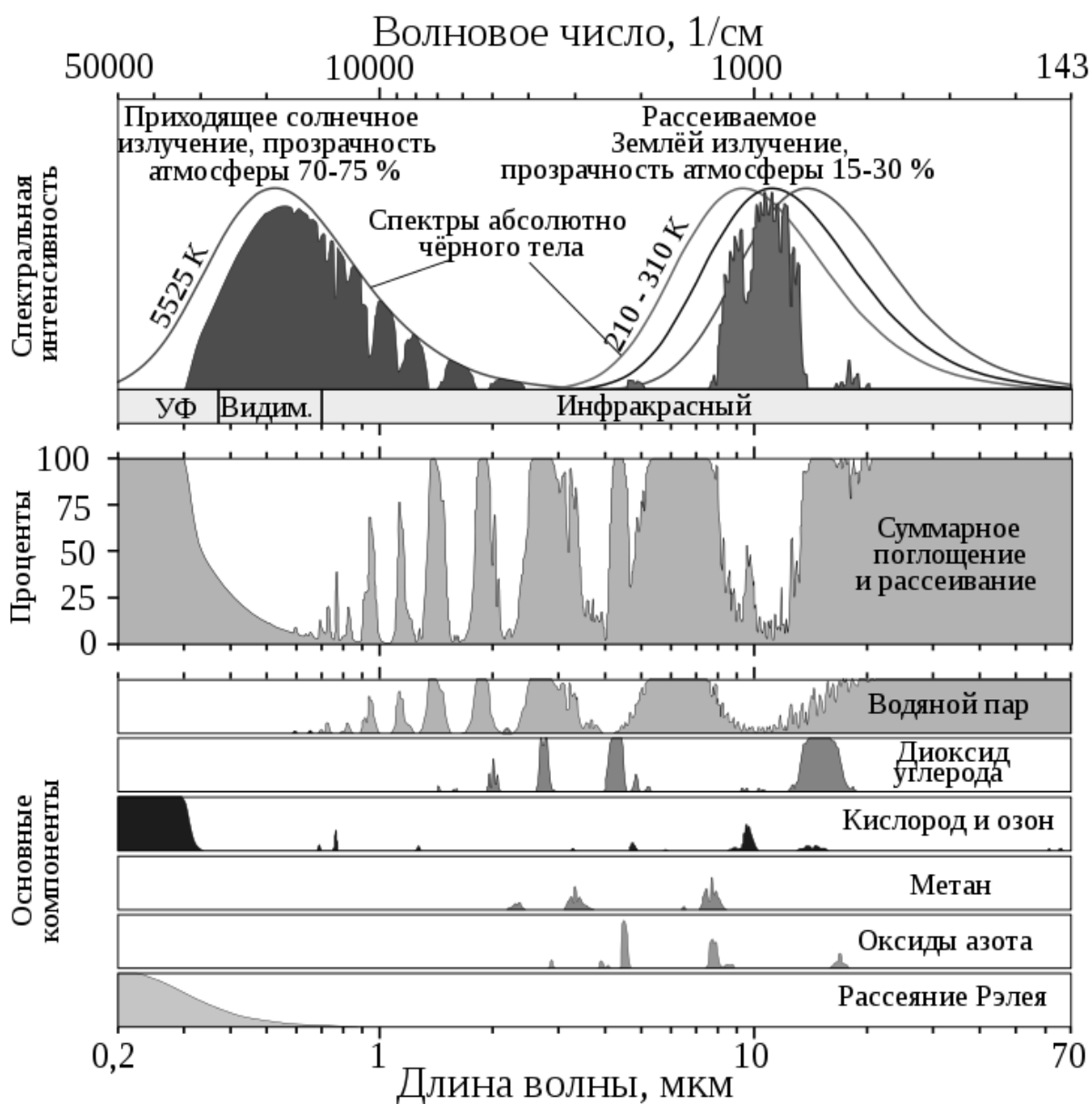


Рис. 7.10. Прозрачность атмосферы Земли в видимом и инфракрасном диапазонах. Верхний график: интенсивность солнечного излучения (слева) и инфракрасного излучения поверхности Земли (справа) – приведены спектры без учёта и с учётом поглощения. Средний график: суммарное поглощение и рассеивание в атмосфере в зависимости от длины волны. Нижняя группа графиков: спектры поглощения различных парниковых газов и рэлеевское рассеяние.

Поведение парниковых газов также различается. Из-за наличия на Земле огромных открытых водных поверхностей и примерно постоянной относительной влажности воздуха, количество

водяного пара в атмосфере зависит в первую очередь от температуры и растет с ее повышением. По парниковому эффекту, вызываемому  $\text{H}_2\text{O}$ , существует положительная обратная связь с температурой – с ростом потока энергии, падающей на Землю (с увеличением светимости Солнца  $L_\odot$ ), возрастает эффективная температура  $T_{\text{eff}}$  усиливается испарение воды, её содержание в атмосфере увеличивается, что приводит к увеличению парникового эффекта  $\Delta T_{\text{парн}}$ . В результате температура на поверхности Земли  $T_{\text{eff}} + \Delta T_{\text{парн}}$  растёт быстрее, чем предсказывает формула (7.3).

Количество  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере Земли сегодня от температуры почти не зависит. Рост количества  $\text{CO}_2$  в первую очередь связан со сжиганием ископаемого топлива. Основными источниками  $\text{CH}_4$  являются болота, крупный рогатый скот и рисовые поля. Повышение парникового эффекта  $\Delta T_{\text{парн}}$  не ограничивается только вкладом этих газов. Оно сопровождается увеличением количества водяного пара в атмосфере, который и дает основной вклад в повышение температуры.

#### 7.3.4. Антипарниковый эффект

Так называют атмосферный эффект, противоположный парниковому, не нагревающий, а охлаждающий поверхность космического объекта. Антипарниковый эффект имеет место, если атмосфера небесного тела поглощает или отражает солнечное излучение и, одновременно, пропускает инфракрасное излучение его поверхности. В результате температура поверхности тела оказывается ниже  $T_{\text{eff}}$ , а величина парникового эффекта – отрицательной ( $\Delta T_{\text{парн}} < 0$ ).

В Солнечной системе известен один объект, где антипарниковый эффект действует постоянно. Это Титан – спутник Сатурна. Титан – единственный спутник в Солнечной системе, обладающий плотной атмосферой, его поверхность невозможно наблюдать в видимом диапазоне из-за облачного покрова. Давление атмосферы Титана у поверхности примерно в 1.6 раза превышает давление земной атмосферы, температура – минус 170–180°C. Аэрозоли в

атмосфере Титана содержат сложные органические молекулы, которые поглощают 90% солнечного излучения, но почти прозрачны в средней инфракрасной области спектра.

В результате поверхность холоднее, чем должна быть, и  $\Delta T_{\text{парн}} = -10^{\circ}\text{C}$ ). Этот эффект также вызывает обратную температурную зависимость в атмосфере Титана – с удалением от поверхности спутника температура атмосферы возрастает.

Наблюдаются также временные (локальные) антипарниковые эффекты. Они происходят на Марсе, во время пылевых бурь, и на Земле, в зоне извержения вулканов, сопровождающихся выбросами пыли в верхние слои атмосферы.

Антипарниковым эффектом объясняется сильное понижение температуры во время «ядерной зимы» или после падения на Землю крупного астероида.

Возможно, постоянный антипарниковый эффект действовал в первичной атмосфере Земли, существовавшей после её образования. Учитывая, что 4 млрд лет назад светимость Солнца была на четверть меньше, чем сегодня, на ранней Земле должно было быть существенно холоднее.

## **7.4. Близкие последствия глобального потепления**

### **7.4.1. Воздействия изменения климата**

В последние десятилетия изменения климата стали причиной существенных воздействий на естественные и антропогенные системы на всех континентах и в океанах. Воздействия вызваны наблюдаемым глобальным потеплением, независимо от его причины. При продолжении глобального потепления эти воздействия будут усиливаться, как из-за возрастания изменений климата, так и из-за увеличения продолжительности воздействия этих изменений.

Доказательства воздействий наблюдаемого изменения климата наиболее существенны и всесторонни для природных систем. Во многих регионах меняющиеся осадки или тающий снег и лёд вызывают изменения в гидрологических системах, затрагивая водные ресурсы в плане их количества и качества.



Вследствие происходящих изменений климата многие наземные, пресноводные и морские виды изменили свои географические ареалы, сезонную активность, характер миграции, численность и взаимодействие с другими видами. Зарегистрировано более раннее начало цветения целого ряда растений.

Ряд исследований, проведенных в различных регионах и для разных сельскохозяйственных культур, показывает, что глобальное потепление чаще оказывает негативное воздействие на урожайность сельскохозяйственных культур, чем положительное. Высказанные выше утверждения иллюстрирует рис. 7.11.

Следует заметить, что воздействие на экологические системы оказывает не только изменение климата, но и нарушение экологии, вызванное химическим загрязнением среды, а также сокращение территорий, занятых естественными биоценозами из-за урбанизации, обширной сельскохозяйственной деятельности, массового вылова рыбы и морепродуктов, добычи полезных ископаемых и т. д. Бывает затруднительно отделить воздействие этих причин от изменений климата, вызываемых глобальным потеплением.

Рассмотрим некоторые последствия изменений климата.

— Более высокие температуры.

Почти на всех участках суши наблюдается увеличение количества жарких дней и тепловых волн. 2023 и 2024 гг. стали одними из самых жарких за всю историю наблюдений. Повышенные температуры являются причиной роста заболеваний, связанных с жарой, и могут затруднять работу и передвижение людей. Более жаркие погодные условия способствуют возникновению и более быстрому распространению природных пожаров.

— Более сильные штормы и ураганы.

Температурные изменения вызывают изменение характера осадков. Это приводит к более сильным и частым штормам и ураганам. Они вызывают наводнения и оползни, разрушают дома и населенные пункты и наносят ущерб, исчисляемый миллиардами долларов.

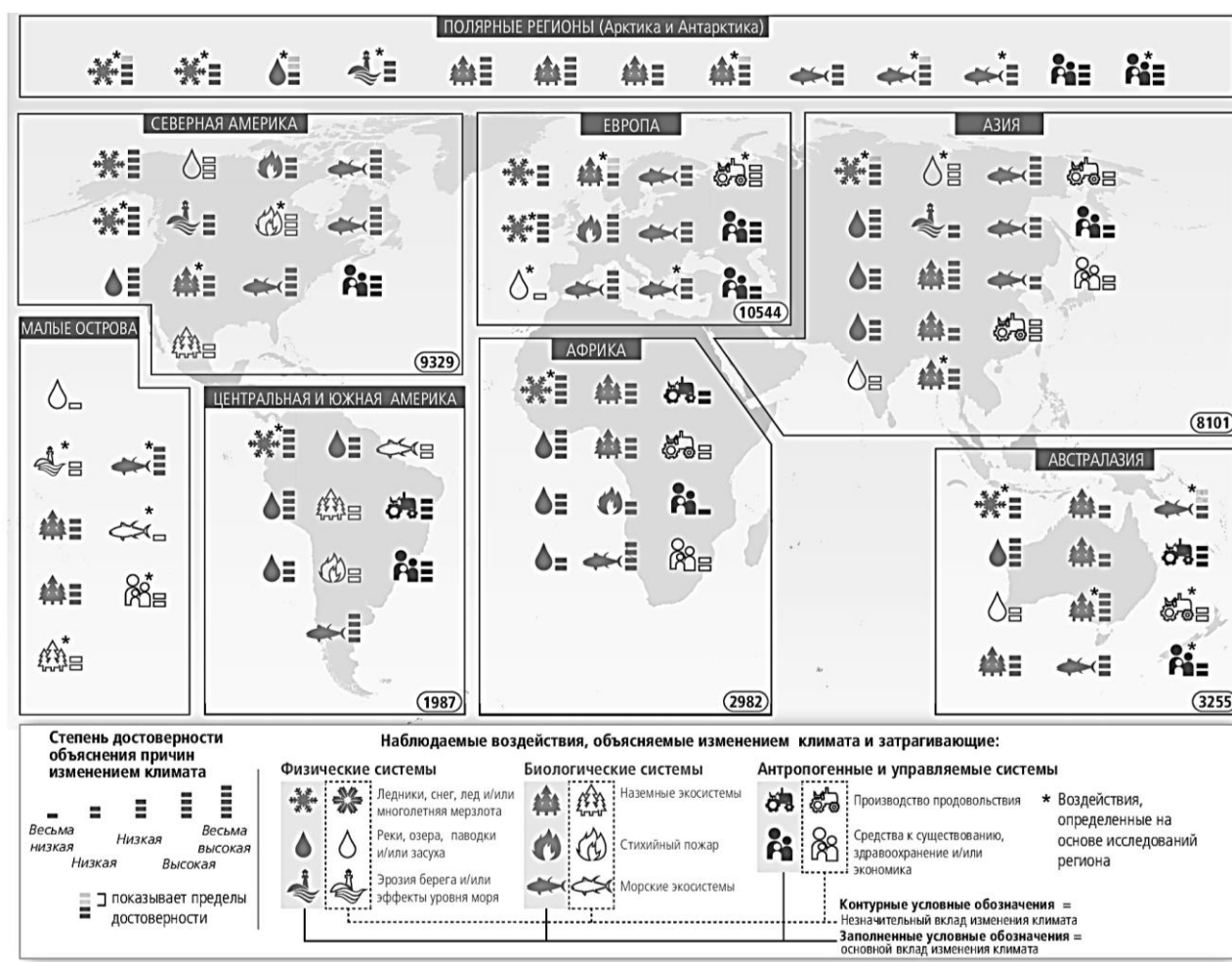


Рис. 7.11. Большое число воздействий на окружающую среду объясняются изменением климата. Условные обозначения указывают категории объясняемых воздействий, относительный вклад изменения климата (основной или незначительный) в наблюдаемое воздействие и степень достоверности установления причины [7.2]. Цифры в овалах показывают количество публикаций в области изменения климата в соответствующем регионе в период 2011-2020 гг.

### — Усиление засухи.

Вода становится дефицитным ресурсом во всё большем числе регионов. Засухи могут сопровождаться песчаными и пыльными бурями, которые могут переносить миллиарды тонн песка через континенты. Из-за расширения площади пустынь сокращается площадь земель, пригодных для выращивания продовольственных культур. Сегодня многие люди регулярно сталкиваются с угрозой отсутствия достаточного количества воды. Отдельно стоит вопрос о питьевой воде.

— Дефицит продовольствия.

Изменение климата приводит к снижению продуктивности или уничтожению, растениеводства, животноводства и рыболовства. Это одна из причин расширения масштабов голода и плохого питания во всем мире. В результате глобального потепления возможно сокращение запасов воды и площадей пастбищ для выпаса скота.

— Исчезновение видов животных и растений.

Изменение климата создает риски для выживания видов, обитающих на суше и в океане. Эти риски возрастают по мере повышения температуры. К числу многих угроз, связанных с изменением климата, относятся лесные пожары, экстремальные погодные условия, инвазивные вредители и болезни. Некоторые виды смогут мигрировать в новые места обитания и выжить, но не все.

— Увеличение рисков для здоровья людей.

Изменение погодных условий приводит к распространению ряда заболеваний, например, малярии. Экстремальные погодные явления приводят к росту заболеваемости и смертности и затрудняют работу систем здравоохранения. К другим рискам для здоровья относятся плохое питание в местах, где люди не могут выращивать продовольственные культуры или обеспечить себя достаточным количеством продовольствия.

— Нищета и вынужденные миграции населения.

Изменение климата усиливает факторы, которые обрекают людей на нищету и не позволяют им вырваться из нее. Наводнения могут сметать городские трущобы, разрушая дома и источники средств к существованию. Жара может затруднить работу на открытом воздухе. В результате связанных с погодой стихийных бедствий более 20 млн человек в год становятся вынужденными переселенцами и из-за этого еще более подвержены нищете.

— Экстремальные погодные явления.

К этим явления относятся:

- засуха;
- тропические циклоны;

- ураганы;
- наводнения и бурные паводки;
- оползни и селевые потоки;
- пыльные и песчаные бури;
- экстремальная жара и тепловые волны;
- грозы;
- торнадо и смерчи;
- лесные или природные пожары;
- ливни;
- снегопады;
- лавины;
- нашествия саранчи.

Из-за глобального потепления частота всех этих явлений, кроме снегопадов и лавин будет возрастать. Например, опасная жара, которая раньше в конкретном регионе возникала раз в 50 лет, сейчас, при повышении глобальной температуры на 1 °С, можно ожидать уже раз в 10 лет, при потеплении на 1.5 °С – каждые пять лет. Если глобальное потепление достигнет 4 °С, такая аномальная жара будет случаться каждый год.

#### 7.4.2. Повышение уровня океанов

Глобальное потепление сопровождается таянием льдов. Ледники на Земле занимают 16 млн км<sup>2</sup>, это 11% всей площади суши. Объем ледников на Земле превышает 30 млн км<sup>3</sup>. Первые три места по объему льдов на Земле занимают:

- 1-е место – Антарктида – толщина слоя льда достигает 4 км;
- 2-е место – Арктика, плавающие льды на поверхности Северного Ледовитого океана;
- 3-е место – ледники Гренландии.

При таянии всех ледников подъем уровня мирового океана составит 65 м. Из них 57 м подъема уровня океана вызовут растаивающие льды Антарктиды, а оставшиеся 8 м – ледники Гренландии. Таяние ледяного покрова Арктики не изменит уровень океана, поскольку эти льды плавающие (согласно закону Архимеда).

Современные расчёты не позволяют точно сказать, произой-

ли полное таяние льдов на Земле, сколько времени оно займет и какая на момент исчезновения ледников на Земле будет температура. Зато легко ответить на вопрос, как при таком повышении уровня моря изменятся очертания материков.

Эта задача решается достаточно просто – для этого нужна детальная физическая карта Земли или ее 3D-модель. На них надо провести горизонтали, соответствующие высоте 65 м от современного уровня моря. В результате происходят следующие изменения контуров материков:

- Европа: С лица мира исчезнут Голландия и часть Дании. После таяния льдов под водой окажутся Лондон и Венеция. Каспийское море вдвое увеличится по площади, а Черное море поглотит Одессу и Стамбул.
- Восточная и юго-восточная Азия: Китай распрощается с небольшой частью своей территории. Изменения коснутся прибрежных земель Индии. От Камбоджи почти ничего не останется – Кардамоновы горы превратятся в острова.
- Россия: Черное и Азовское моря сольются, пролив соединит их с Каспийским морем. Наполнится Аральское море. Появится большой залив на севере Западной Сибири.
- Африка: По сравнению с другими континентами, Африка потеряет меньше всего суши. На дно полностью уйдут лишь Александрия и Каир. Но из-за глобального потепления большая часть материка станет непригодной для жизни.
- Северная Америка: Больше всего пострадает восточное побережье. Навсегда исчезнут Нью-Йорк, Бостон, Майами.
- Южная Америка: Бассейн Амазонки на севере материка и реки в Парагвае на юге станут заливами, уничтожив Буэнос-Айрес, побережье Уругвая и большую территорию Парагвая.
- Австралия: Пустыня в центре континента превратится в огромное озеро с соленой водой. Прибрежные города, где живет большая часть австралийцев, затопит океан.
- Антарктида: Этот материк практически исчезнет. Без ледового щита этот континент находится почти на уровне моря. Подъем уровня океана «съест» большую часть суши (см. Рис. 7.12).

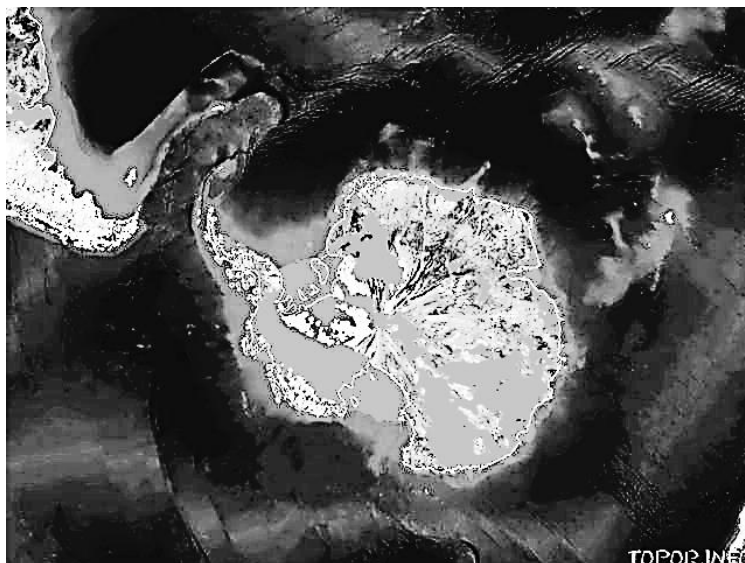


Рис. 7.12 Антарктида после исчезновения льдов и подъема уровня моря на 65 м. Останутся лишь отдельные возвышенные участки. (показаны белым).

Посмотреть все соответствующие карты можно на сайте [7.4].

Человечество любит селиться на побережьях морей, это плохо скажется на судьбе многих городов, если уровень моря повысится. Под воду уйдут: Венеция, Астрахань (средняя высота 1 м), Калининград, Одесса, Пиза (3 м), Брюгге, Владивосток, Бангкок, Копенгаген (5 м), Шанхай, Санкт-Петербург, Рига, Архангельск, Багамы, Сочи, Майами (10 м), Таллин, Дублин, Буэнос-Айрес, Бостон (13 м), Нью-Йорк, Лондон (20 м).

Некоторые ученые оценивают скорость подъема уровня океана в 1 м за 100 лет, но эта оценка очень неточна. За XX век уровень моря повысился на 17 см.

#### 7.4.3. Остановка Гольфстрима

Климатическую роль Гольфстрима в жизни Европы трудно переоценить: от его стабильности во многом зависит существование этой части света именно в том виде, в каком она существует сейчас. По этой причине ученые с особой тщательностью изучают течение и были очень обеспокоены тем, что течение Гольфстрима замедляется, а его циркуляция ослабевает.

Гольфстрим зарождается в тропиках Северной Америки у побережья полуострова Флорида. Затем теплое течение с повышенной соленостью движется на север вдоль восточного побережья Северной Америки. Ширина этого теплого водного потока достигает 70-90 километров, скорость около 6 км/час. В Северной Атлантике, у Ньюфаундлендской банки течение начинает остывать, опресняется и разделяется на ряд потоков. Одно из его продолжений – Северо-Атлантическое течение – двигается далее на северо-восток, вдоль Скандинавского полуострова, и втекает в Северный ледовитый океан, принося в этот регион земного шара значительное количество тепла. Так, например, зимой температура воздуха в Норвегии выше на 15–20 °С, чем на таких же широтах в других местах планеты. Это же течение доносит тепло и до северных берегов европейской части России.

Из Северного Ледовитого океана в Атлантический движется Лабрадорское течение. Это холодное морское течение, протекающее между побережьем Канады и Гренландией и устремлённое в южном направлении из моря Баффина до Ньюфаундлендской банки. Оно движется гораздо медленнее, со скоростью 25–55 см/с; его температура на поверхности изменяется от минус 1 °С до 8°С. Вода Лабрадорского течения из-за происхождения из Северного Ледовитого океана относительно несолёная (30–32‰).

Около Ньюфаундленда Гольфстрим и Лабрадорское течение сталкиваются и «пересекаются» (см. Рис. 7.13). Два потока жидкости не могут пройти друг сквозь друга. Проблема решается тем, что течения движутся на разной глубине: Гольфстрим – по поверхности океана, а Лабрадорское течение – несколько глубже. Глубина, на которой движется течение, определяется плотностью воды в нем. На плотность воды влияют два фактора: температура и солёность. Повышение температуры снижает плотность воды, а рост солёности, наоборот, повышает.

Гольфстрим теплый и солёный, а Лабрадорское течение холодное, но более пресное. В нашу эпоху вода Лабрадорского течения чуть более плотная, чем в Гольфстриме, поэтому оно проходит ниже. Из-за глобального потепления тают льды Северного Ледо-



Рис. 7.13. Гольфстрим (сплошные стрелки) и Лабрадорское (штриховые стрелки) течения.

витого океана, и вода в нем делается более пресной. Если плотности воды в течениях сравниваются, то они столкнутся по-настоящему, Гольфстрим будет повернут на юг и не достигнет северных берегов Европы.

Моделирование показывает, что «остановка» Гольфстрима, точнее его отклонение Лабрадорским течением, может произойти очень быстро, всего за несколько лет.

С другой стороны, исследование донных отложений в европейской части Северного Ледовитого океана показало, что остановка Гольфстрима в прошлом происходила неоднократно, этот процесс случается примерно каждые 5000–10 000 лет, т. е. глобальное потепление не является необходимым условием для остановки Гольфстрима.

Если Гольфстрим остановится, то климат в северной части Европы и в европейской части России станет похожим на сибирский – резко континентальный с морозами в минус 40 °С зимой. Это может оказаться самым сильным эпизодом похолодания на фоне глобального потепления.



## 7.5. Климатические катастрофы

Парниковый эффект, который мы рассматривали выше, – стационарное явление. Несмотря на то, что температура на поверхности  $T_{\text{пов}}$  выше, чем была бы эффективная температура безатмосферной планеты  $T_{\text{eff}}$ , поток энергии падающий на неё в точности равен потоку энергии, испускаемому планетой в космос.

Изменение количества парниковых газов в атмосфере или потока энергии, падающей на планету (т. е. светимости Солнца), приводит к изменению  $T_{\text{пов}}$  – переводит состояние атмосферы в новое равновесное состояние.

Новое состояние обычно тоже оказывается устойчивым, поскольку поток теплового излучения, испускаемый планетой, подчиняется закону Стефана-Больцмана (см. (7.2)), где  $T$  – температура излучающей области. При малой оптической толще атмосферы излучать будет поверхность планеты и  $T = T_{\text{пов}}$ , если же толща большая, то излучает область, для которой оптическая толща в наружном направлении примерно равна единице, ее температура  $T_1$ , и  $T = T_1 < T_{\text{пов}}$ . Высокая (4-я) степень зависимости потока излучения от  $T$  говорит о том, что для компенсации изменения состояния атмосферы нужно небольшое изменение температуры. Этой отрицательной обратной связи обычно достаточно для достижения равновесия.

Однако возможны ситуации, когда равновесие нарушается, такие явления неконтролируемым (неограниченным) парниковым эффектом (англ. «runaway greenhouse effect») или климатическими катастрофами.

### 7.5.1. Влажная климатическая катастрофа

Рассмотрим следующую модельную ситуацию. Атмосфера состоит из двух компонент: прозрачного диатермического газа и насыщенного водяного пара. Пар в атмосфере появляется из-за её контакта с открытой водной поверхностью океанов. Возможен вариант, в котором в атмосфере водяной пар не насыщенный, а находится при постоянной относительной влажности.

Поток солнечного излучения  $W_{\text{in}}$  в видимом диапазоне пада-

ет на поверхность Земли<sup>6</sup>, нагревает её и переизлучается в инфракрасном диапазоне. Но в инфракрасном диапазоне атмосфера непрозрачна (см. Рис. 7.10). Инфракрасное излучение поверхности поглощается нижними слоями атмосферы, нагревает их, в результате возникает конвекция – в атмосфере возникает температурное распределение, соответствующее так называемому адиабатическому градиенту, в котором температура падает с высотой. Излучение покидает атмосферу из слоев, расположенных на высоте  $h_1$ , в которых оптическая толща в наружном направлении примерно равна единице. На современной Земле атмосфера становится оптически толстой для наблюдателя снаружи на высоте около 9 км. Эти слои более холодные, их температура  $T_1$  ниже, чем поверхность Земли и нижние слои атмосферы. Мощность инфракрасного излучения с единицы поверхности атмосферы равна  $\sigma T_1^4$ .

При увеличении потока излучения Солнца  $W_{in}$ , падающего на Землю, температура поверхности возрастает, некоторое количество воды испаряется с поверхности океанов и переходит в атмосферу. Оптическая толща атмосферы в инфракрасном диапазоне возрастает, высота положения слоев с единичной оптической толщей  $h_1$  возрастает.

Расчеты показывают, что с увеличением  $W_{in}$  рост температуры слоев с единичной оптической толщей  $T_1$  происходит медленнее, чем рост температуры поверхности  $T_{пов}$ , при больших значениях  $W_{in}$  температура  $T_1$  асимптотически стремится к некоторому максимальному значению  $T_{max}$ .

Такое поведение легко объяснить: повышение  $W_{in}$  вызывает возрастание  $T_{пов}$ , дополнительное испарение воды и повышение границы оптически толстого слоя атмосферы  $h_1$ . Повышения  $T_{пов}$  и  $h_1$  происходят таким образом, что при больших  $W_{in}$  (и, соответственно,  $T_{пов}$ ) температура слоев с единичной оптической толщей  $T_1$  остается постоянной и равной  $T_{max}$ .

В работе [7.5] показано, что предельный поток излучения от верхних слоев атмосферы составляет  $W_{max} = 385 \text{ Вт/м}^2$ . Это так называемый предел Комабаяси-Ингерсолла. (Комабаяси в 1967, а

---

<sup>6</sup> Речь идет о потоке излучения, поглощаемого поверхностью и атмосферой Земли, т. е. с учётом ее альбедо.

Ингерсолл в 1969 независимо предсказали существование влажной парниковой катастрофы). При таком потоке излучения температура на поверхности Земли будет равна  $T_{\text{пов}} = 47^\circ\text{C}$ . Напомним, что величина  $W_{\text{in}}$  – поток излучения Солнца, поглощаемый поверхностью и атмосферой Земли; согласно рисунку 7.7  $W_{\text{in}} = 240 \text{ Вт/м}^2$  (на рисунке 7.8  $239 \text{ Вт/м}^2$ ).

В работе [7.5] сделаны упрощающие предположения, такие как независимость коэффициента поглощения водяного пара в инфракрасном диапазоне от длины волны, прозрачность всей атмосферы в оптическом, а диатермической компоненты – в инфракрасном диапазоне, отсутствие других парниковых газов. Учёт этих эффектов, сделанный позднее, дает немного меньшее значение предела Комабаяси-Ингерсолла  $W_{\text{max}} = 320 \text{ Вт/м}^2$ .

Светимость Солнца возрастает на 1% за 110 млн лет. Соответственно  $W_{\text{in}}$  достигнет предельного уровня  $W_{\text{max}} = 320 \text{ Вт/м}^2$  примерно через 3 млрд лет. После этого тепловое равновесие в атмосфере Земли нарушится, начнется интенсивное испарение океанов. Процесс будет протекать очень быстро – океаны полностью испарятся за несколько сотен лет. После полного испарения жидкой воды наступит новое равновесное состояние, в котором вся вода в виде пара находится в атмосфере, с существенно более мощным парниковым эффектом.

В работах других авторов есть и более низкие оценки предела Комабаяси-Ингерсолла. Если использовать эти значения влажная климатическая катастрофа на Земле может произойти раньше – через 1 млрд лет.

#### 7.5.2. Углекислотно-водная парниковая катастрофа

Добавим к модели атмосферы в сценарии, рассмотренном в подразделе 7.5.1, другие парниковые газы, концентрация которых не зависит или слабо зависит от температуры на поверхности Земли, например,  $\text{CO}_2$ . Далее будем рассматривать только  $\text{CO}_2$ , как второй по эффективности парниковый газ после  $\text{H}_2\text{O}$ .

Предположим, что концентрация  $\text{CO}_2$  совершенно не зависит от температуры. Введение этого газа в атмосферу вызовет некоторое увеличение парникового эффекта. Если после добавления  $\text{CO}_2$

температура на поверхности Земли не превысит  $T_{\text{пов}} = 47^{\circ}\text{C}$ , т. е. предел Комабаяси-Ингерсолла не будет превышен, то получаем новую устойчивую конфигурацию атмосферы. Из-за наличия  $\text{CO}_2$  эффективный предел Комабаяси-Ингерсолла понижается, климатическая катастрофа из-за повышения светимости Солнца наступит раньше.

Однако, кругооборот углерода в природе, в том числе в форме  $\text{CO}_2$ , зависит от температуры. Эта зависимость более сложная, чем у  $\text{H}_2\text{O}$ . На рисунке 7.14 показаны запасы и потоки углерода на Земле, а на рисунке 7.15 – влияние различных процессов на циркуляцию углерода.

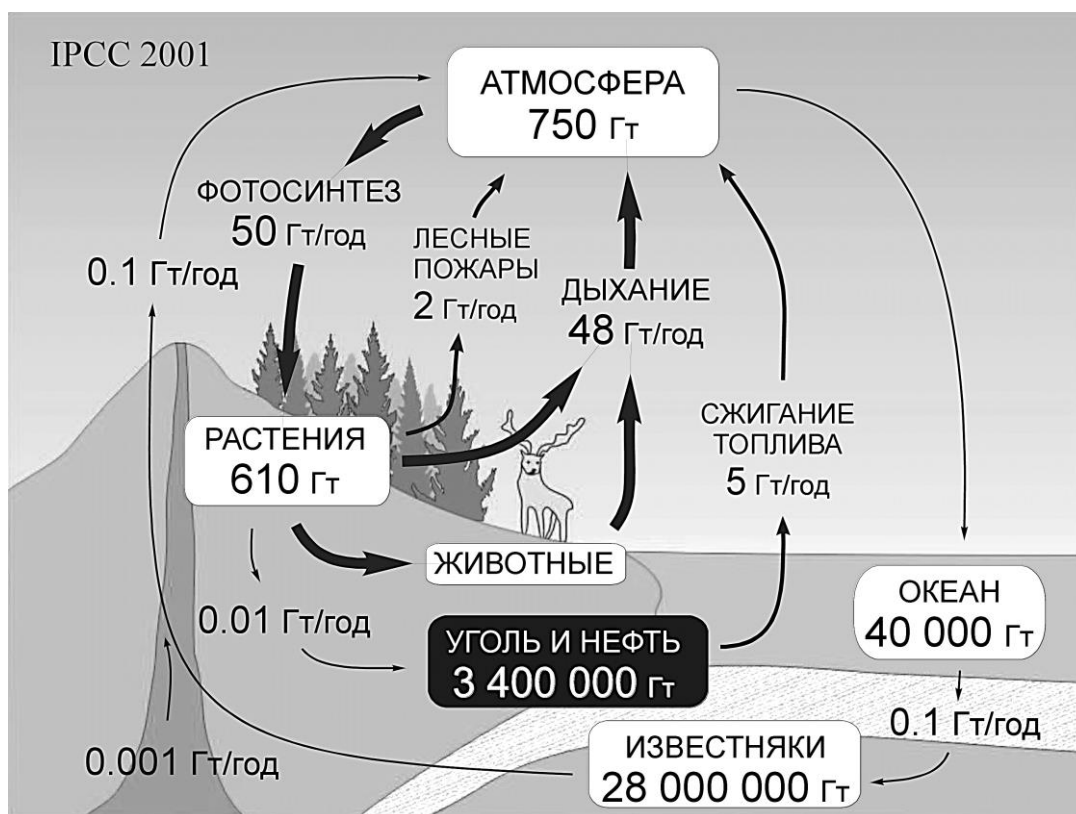


Рис. 7.14. Запасы и кругооборот углерода на Земле.

К рисунку 7.14 следует дать пояснения. Наибольшее количество углерода на Земле – 28 млн Гт – содержится в известняках. На втором месте стоит ископаемое топливо – 3.4 млн Гт. На третьем месте – 40 тыс. Гт – углерод в виде  $\text{CO}_2$ , растворенного в воде океанов. В самой атмосфере углерода немного, всего 750 Гт, в виде  $\text{CO}_2$ .

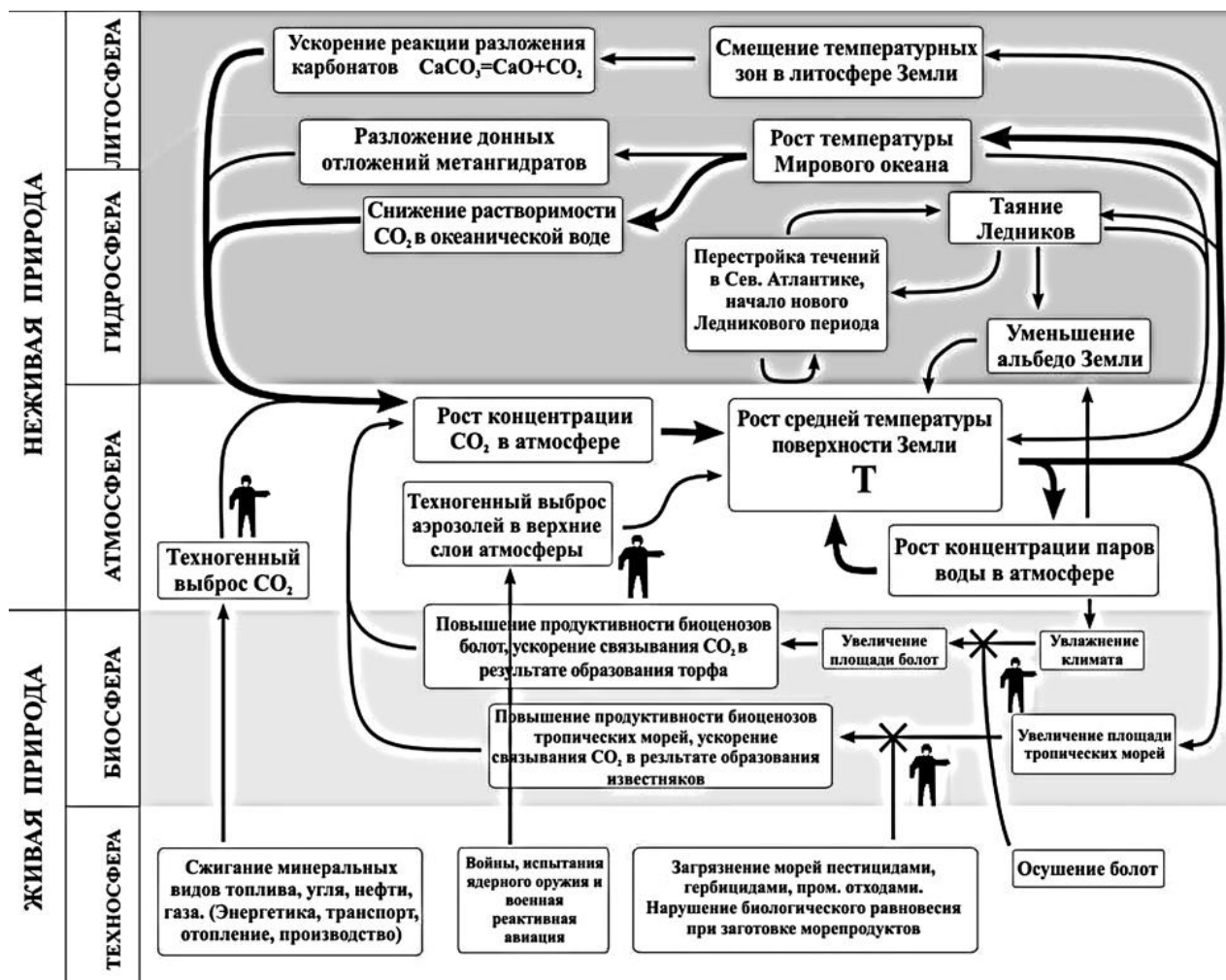


Рис. 7.15. Природные и антропогенные/техногенные воздействия на циркуляцию углерода на Земле.

Углерод в количестве примерно 5 Гт/год поступает в атмосферу в виде  $\text{CO}_2$  за счет сжигания угля, нефти и газа. Сегодня это основной путь антропогенного поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Других каналов поступления в атмосферу углерода, запасённого в ископаемом топливе, нет<sup>7</sup>. Большинство запасов ископаемого топлива залегают глубоко под землёй, температура на поверхности на их состояние практически не влияет.

Наблюдающееся в XX-XXI веках глобальное повышение температуры, по всей видимости, связано со сжиганием ископаемого топлива. Предложены планы по сокращению техногенных

<sup>7</sup> Пожары в шахтах и на скважинах включены в канал «сжигание топлива».

выбросов в середине XXI века. Однако есть и другие механизмы поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

При повышении температуры происходит нагрев воды в океанах, это в свою очередь приводит к снижению растворимости газов в воде. Зависимость для  $\text{CO}_2$  показана на рисунке 7.16.

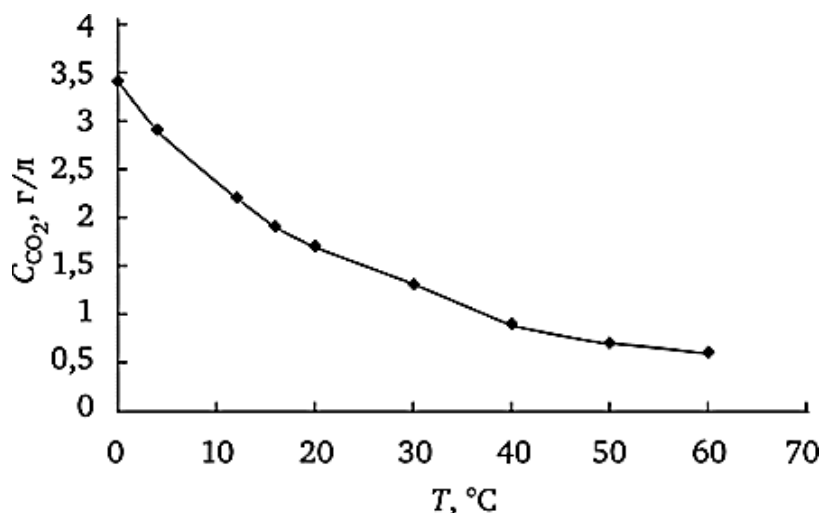


Рис. 7.16. Зависимость растворимости  $\text{CO}_2$  от температуры при нормальном давлении.

Это приводит к дополнительному выделению  $\text{CO}_2$  из воды в атмосферу – «эффекту шампанского». Тут присутствует положительная обратная связь – выделение  $\text{CO}_2$  приводит к повышению температуры приповерхностной области Земли, в том числе океанов, а это в свою очередь ведет к снижению растворимости  $\text{CO}_2$  в воде и дополнительному выбросу его в атмосферу.

Из рисунка 7.16 видно, что повышение температуры на  $1^\circ\text{C}$  приводит к выделению  $\sim 2\%$  растворенного в воде  $\text{CO}_2$ , что составляет около 800 Гт углерода. Поскольку повышение температуры на  $1^\circ\text{C}$  заняло около 100 лет, то поток углерода из океанов будет составлять порядка 8 Гт/год, что больше, чем за счет сжигания ископаемого топлива. На самом деле это значение существенно завышено, поскольку глобальное потепление пока влияет на температуру поверхностных слоев океанов до глубины 200–600 м (при средней глубине океанов 3 км), а более глубокие слои пока остаются незатронутыми – их температура  $+4^\circ\text{C}$  соответствует наибольшей плотности воды.

Если температура Земли превысит 50–60°C, то начнется разложение известняков



и практически весь углерод Земли окажется в атмосфере в виде  $\text{CO}_2$ .

Углекислотно-водная климатическая катастрофа развивается медленнее, чем влажная катастрофа после достижения предела Комабаяси-Ингерсолла. Однако она может начаться гораздо раньше. Эта модель наиболее близка к ситуации, которая существует на Земле сегодня.

Похожая положительная связь есть и для другого парникового газа – метана ( $\text{CH}_4$ ). Его содержание в атмосфере в последние десятилетия устойчиво растет (см. Рис. 7.17, а также Рис. 7.5). Основными источникам метана сегодня являются болота, крупный рогатый скот и рисовые поля (см. Рис. 7.18). Последние два источника в современных масштабах – чисто антропогенные. Метановая продуктивность болот сложным образом связана с температурой – при низких температурах генерация  $\text{CH}_4$  прекращается, при высоких – болота высыхают, и продуцирование  $\text{CH}_4$  прекращается также.

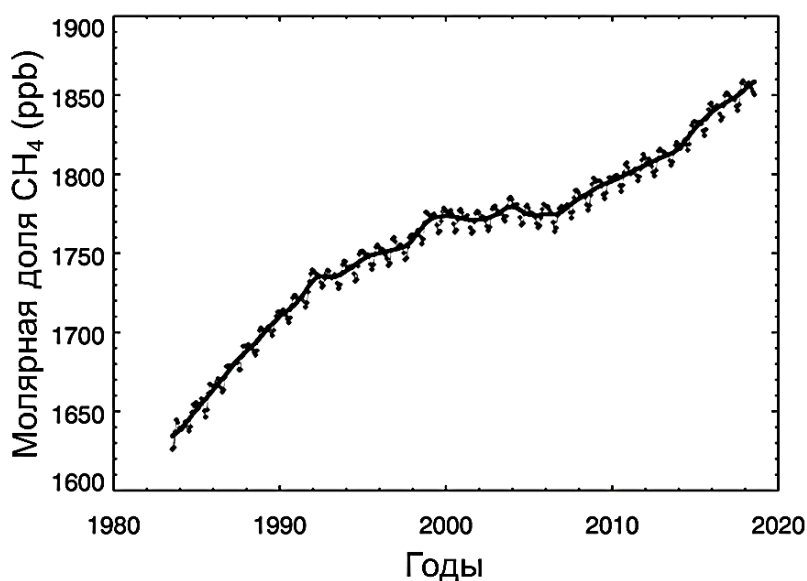


Рис. 7.17. Рост содержания метана в атмосфере Земли.

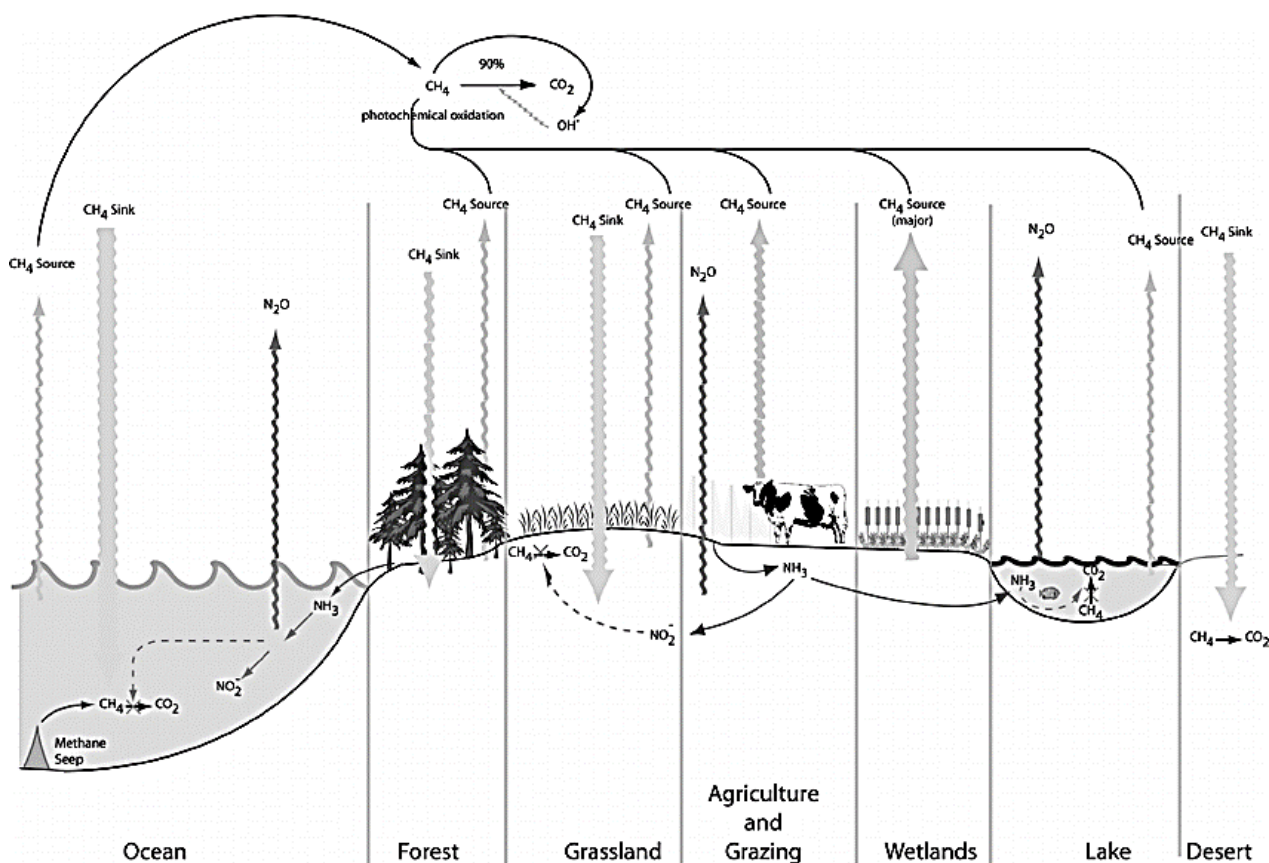


Рис. 7.18. Круговорот  $\text{CH}_4$  на Земле.

В качестве потенциально важного источника метана в последние годы рассматриваются так называемые метановые газогидраты – рыхлые структуры, в которых  $\text{CH}_4$  включен в кристаллическую решетку воды. В  $1 \text{ м}^3$  газогидрата может содержаться до  $170 \text{ м}^3$   $\text{CH}_4$ . Газогидраты устойчивы при низких температурах или при высоких давлениях, поэтому они обнаруживаются в вечной мерзлоте и в морских отложениях на глубинах более 500 м. При повышении температуры они разлагаются с выделением  $\text{CH}_4$ . Но существует задержка: для разложения газогидратов в вечной мерзлоте они должны растаять, для разложения газогидратов в морских отложениях – океан должен прогреться на большую глубину.

Результат углекислотно-водной климатической катастрофы схож с результатом влажной – все открытые водоемы испаряются, водяной пар уходит в атмосферу. В дополнение к этому разлагаются углеродосодержащие соединения и в виде  $\text{CO}_2$  (в основном) также переходят в атмосферу. При наличии устойчивых при низ-



кой температуре источников  $\text{CH}_4$  они также разлагаются и испускают  $\text{CH}_4$  в атмосферу.

### 7.5.3. Что происходит с водой после парниковой катастрофы

В результате развития парниковой катастрофы у поверхности планеты образуется многокилометровый слой атмосферы, насыщенной водяными парами. Верхние слои насыщенного водой слоя атмосферы оказываются доступны ультрафиолетовому излучению Солнца. Жесткие кванты разлагают молекулы воды на кислород и водород. Водород улетучивается из атмосферы, а атомарный кислород вступает в различные реакции, переходя в состав таких соединений, как  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и др.

Пар из более низких слоев атмосферы из-за конвекции переходит в верхние, где процесс разложения молекул воды повторяется. Процесс идет до полного исчезновения водяного пара из атмосферы.

## 7.6. Парниковый эффект и эволюция климата на Венере и Марсе

Венера и Марс – еще две планеты земной группы, обладающие атмосферой, как и Земля. У Меркурия атмосферы практически нет, это связано с его близостью к Солнцу. Венера чуть меньше Земли по размерам и массе, и обращается немного ближе к Солнцу, чем Земля. Марс существенно меньше Земли, а его орбита лежит дальше от Солнца, чем земная.

Атмосферы Марса и Венеры сильно отличаются от земной. Основным газом в них является  $\text{CO}_2$ , практически полностью отсутствует водяной пар, тем более нет открытой воды на поверхности. При этом атмосферы этих планет очень разные: атмосфера Венеры почти на два порядка плотнее земной, у Марса, наоборот, почти на два порядка менее плотная. Земля, Венера и Марс схожи по химическому составу поверхности. Есть предположение, что первичные атмосферы этих планет (сразу после их формирования в Солнечной системе) также были схожи по химическому составу.

У Земли есть три отличия от Венеры и Марса. В атмосфере

Земли присутствует озоновый слой, который полностью поглощает жесткое ультрафиолетовое излучение. У Земли есть магнитное поле, которое препятствует попаданию в атмосферу и на поверхность земли космических лучей. Последнее отличие – на Земле продолжается тектоническая активность (вулканизм, землетрясения, дрейф материков).

Поскольку атмосферы Венеры и Марса состоят в основном из  $\text{CO}_2$ , на обеих планетах есть парниковый эффект.

### 7.6.1. Парниковый эффект на Венере

Венера – самая похожая на Землю планета Солнечной системы. Она чуть меньше Земли, ее радиус составляет 95% от Земного, а масса – 82% массы Земли. Венера обращается вокруг Солнца по орбите с большой полуосью  $a = 0.72$  а.е.

Если посчитать эффективную температуру поверхности Венеры при отсутствии у неё атмосферы по формуле (7.3), то получим значение  $T_{\text{eff},\oplus} = 302$  К или  $+29^\circ\text{C}$ . При получении этой величины использовалось то же значение альбедо  $A = 0.30$ , что и для Земли.

В начале космической эры было распространено мнение, что Венера должна быть очень похожа на Землю, но теплее, на ней везде тропический климат. Приключения на такой Венере были описаны в научно-фантастическом романе Георгия Мартынова «Сестра Земли», написанном в 1966 г. ([7.6]) и основанном на научно-популярных представлениях того времени. Такое представление о Венере сказалось и на космической программе ее исследований – спускаемый аппарат «Венера-4» был раздавлен в атмосфере, спускаемые аппараты «Венера-5» и «Венера-6» также не смогли достичь ее поверхности – никто не ожидал, что давление на поверхности будет почти на два порядка выше, чем на Земле.

Атмосфера Венеры на 96% состоит из  $\text{CO}_2$ , на 3.5% из  $\text{N}_2$ , остальные газы составляют 0.5%. Давление на поверхности Венеры достигает 90 атм. Из-за такого химического состава и высокой плотности атмосферы парниковый эффект на ней очень велик. Температура на поверхности планеты достигает  $T_{\oplus} = 737$  К или  $+464^\circ\text{C}$ . Приrost температуры из-за парникового эффекта состав-

ляет  $\Delta T_{\text{парн}, \ominus} = 435^{\circ}\text{C}$ .

На Венере в прошлом мог произойти неконтролируемый парниковый эффект по углекисло-водному сценарию. В таком случае на Венере мог существовать глобальный океан. По мере увеличения яркости молодого Солнца количество водяного пара в атмосфере увеличивалось, увеличивая температуру и, следовательно, увеличивая темп испарения океана. Выделение углекислого газа из поверхностных пород также ускоряло развитие парниковой катастрофы. В конечном итоге океаны выкипели, и весь водяной пар оказался в атмосфере.

В наши дни в атмосфере Венеры водяного пара почти нет. Если водяной пар действительно когда-то поспособствовал нагреву Венеры, то предполагается, что эта вода полностью ушла в космическое пространство. В пользу этого сценария свидетельствует чрезвычайно высокое отношение дейтерия к водороду в атмосфере Венеры, примерно в 150 раз превышающее Земное. Лёгкий изотоп водорода быстрее уходил из атмосферы, чем более тяжелый дейтерий. Венера достаточно сильно нагревается Солнцем, поэтому водяной пар мог подниматься в верхние слои атмосферы и разлагаться на водород и кислород под действием ультрафиолетового излучения. Затем водород покидал атмосферу, а кислород связывался с горными породами. Углекислый газ, доминирующий в атмосфере Венеры сегодня, обязан своим присутствием слабому механизму циркуляции углерода на Венере по сравнению с Землёй. На Земле углекислый газ, извергаемый вулканами, эффективно возвращается обратно в мантию на геологических временных масштабах благодаря активной тектонике плит. Климатическая катастрофа на Венере произошла от 1 до 3 млрд лет назад.

На рисунке 7.19 схематически показана эволюция температур поверхностей Земли, Венеры и Марса.

### 7.6.2. Парниковый эффект на Марсе

Марс меньше Земли, его радиус составляет 53% от Земного, а масса – 1/10 массы Земли. Марс обращается вокруг Солнца по орбите с большой полуосью  $a = 1.52$  а.е. Если посчитать эффективную температуру поверхности Марса при отсутствии у него

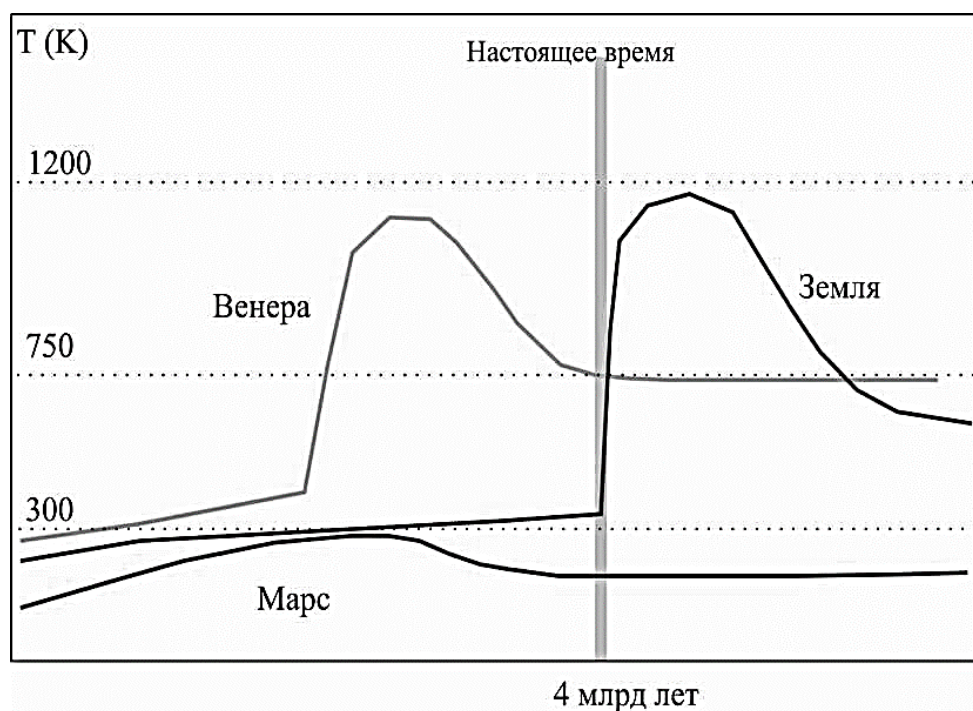


Рис. 7.19. Эволюция средней температуры Земли, Венеры и Марса со временем. Условно теплый и влажный в прошлом Марс потерял свою атмосферу и «замерз». На Венере около 1–3 млрд лет назад произошла климатическая катастрофа. На Земле, возможно, климатическая катастрофа начинается сегодня.

атмосферы по формуле (7.3), то получим значение  $T_{\text{eff},\oplus} = 206^{\circ}\text{K}$  или  $-67^{\circ}\text{C}$ . Альбедо Марса примерно равно альбедо Земли  $A = 0.30$ .

Атмосфера Марса на 95.3% состоит из  $\text{CO}_2$ , на 2.7% из  $\text{N}_2$ , 1.6% —  $\text{Ar}$ , остальные газы составляют 0.4%. Давление на поверхности Марса в 160 раз меньше земного. Из-за такого химического состава атмосфера создает парниковый эффект, но из-за низкой плотности он очень невелик. Средняя температура на поверхности планеты составляет  $T_{\oplus} = 210^{\circ}\text{K}$  или  $-63^{\circ}\text{C}$ . Приrost температуры из-за парникового эффекта составляет  $\Delta T_{\text{парн},\oplus} = 4^{\circ}\text{C}$ .

Красная планета находится дальше от Солнца, поэтому получает от него в два с половиной раза меньше энергии на единицу площади, чем Земля, и ей никогда не грозила климатическая катастрофа. Однако ученые находят на поверхности Марса следы рек, озер и даже морей. Часть из них существовала менее миллиарда лет тому назад, когда атмосфера там уже стала разреженной — за счет ее рассеяния в космос, ведь марсианская сила тяжести всего

0.38 земной. Эта проблема получила название «парадокс молодого тёплого Марса».

Если первичная атмосфера Марса по плотности и химическому составу была близка к первичной атмосфере Земли (в архее), становится понятно, как на его поверхности могла существовать жидкая вода. В прошлом Марс был более тёплым и влажным, с существенно более плотной атмосферой. Затем атмосфера начала рассеиваться из-за низкого тяготения, жидкая вода частично испарилась, а частично замерзла. Водяной пар в атмосфере диссоциировался на кислород и водород под действием солнечного ультрафиолета. Кислород химически связался с марсианским грунтом, а водород улетучился в космос. Сегодня из-за низкого давления вода без примесей, понижающих точку замерзания, не может существовать в жидком состоянии на большей части (около 70%) поверхности планеты.

Эволюция температуры на Марсе со временем схематически показана на рисунке 7.19.

## **7.7. Долговременный прогноз развития глобального потепления на Земле**

Земля по количеству углерода в виде  $\text{CO}_2$  в атмосфере и связанного углерода в виде различных химических соединений в океане и поверхностных слоях суши сравнима с Венерой. Если весь этот углерод превратится в  $\text{CO}_2$  и перейдет в атмосферу, парниковый эффект окажется сравнимым с венерианским. В ходе высвобождения связанного углерода произойдет климатическая катастрофа (см. выше) – воды океанов закипят и полностью испарятся.

За XX и начало XXI веков из-за глобального потепления температура Земли увеличилась примерно на  $1^\circ\text{C}$ . Как будет дальше идти глобальное потепление? Чтобы ответить на этот вопрос требуется моделирование. Его результаты показаны на рисунках 7.20 и 7.21. На первом из этих рисунков показано изменение температуры в ближайшие 150 лет при ограничении выбросов  $\text{CO}_2$  на уровне 2000 г. и при сохранении сегодняшнего темпа роста выбросов. В первом случае прирост температуры (по сравнению с 1900 г.) достигнет  $10^\circ\text{C}$  к 2150 г., во втором – раньше, к 2100 г.

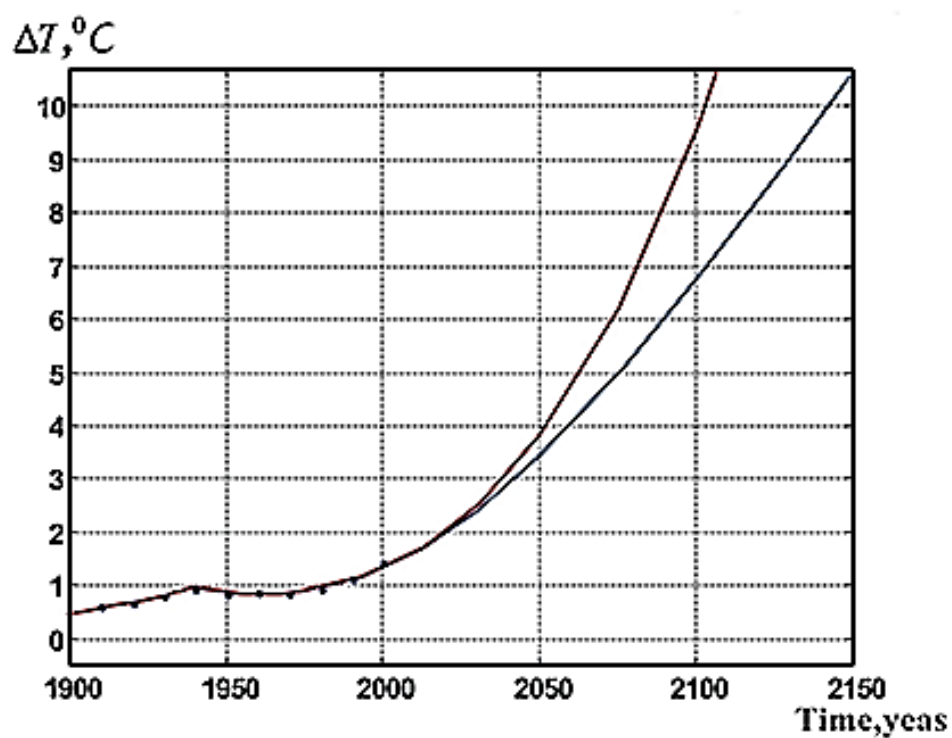


Рис. 7.20. Прогноз глобального потепления до 2150 г. Точки – наблюдательные данные в XX веке, нижняя линия – ограничение выбросов по уровню 2000 г., верхняя линия – продолжение экспоненциального роста выбросов CO<sub>2</sub>.

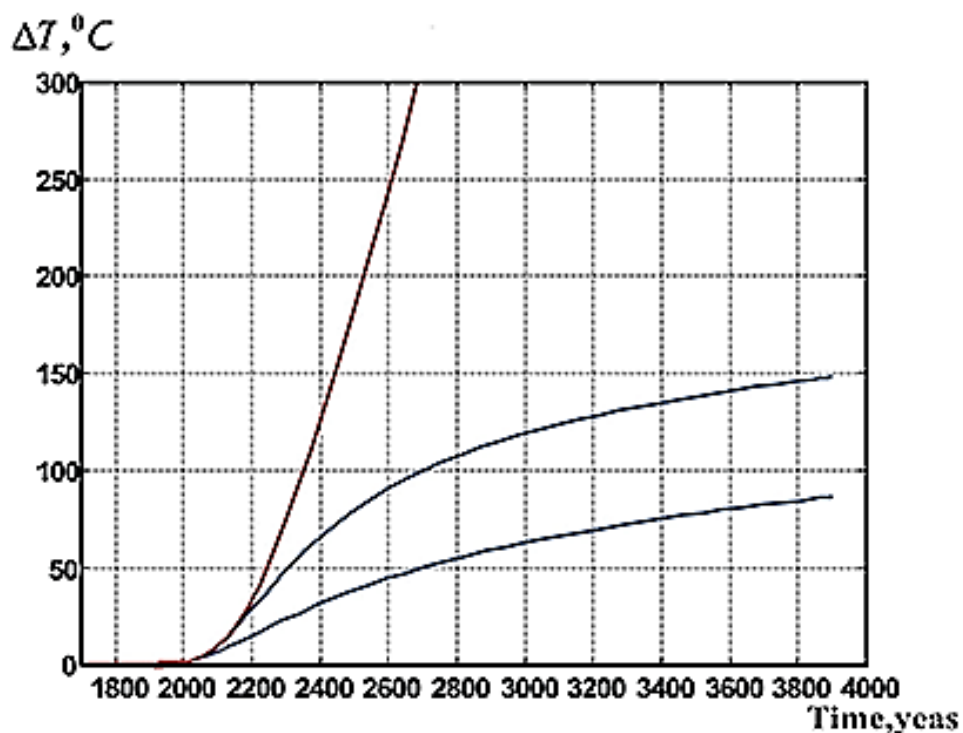


Рис. 7.21. Прогноз глобального потепления на 2000 лет вперед. Нижние линии – ограничение выбросов по уровню 2000 г., (нижняя) и 2100 г. (средняя), верхняя линия – продолжение экспоненциального роста выбросов CO<sub>2</sub>

На рисунке 7.21 показаны три кривые изменения температуры за ближайшие 2000 лет. Нижняя кривая – при сохранении выбросов  $\text{CO}_2$  на уровне 2000 г. В этом сценарии температура на Земле к 4000 г. приближается к  $100^\circ\text{C}$ . Средняя кривая – при сохранении выбросов на уровне 2100 г., а до этой даты шёл их рост в современном темпе. При таких ограничениях температура на Земле к 4000 г. достигнет  $150^\circ\text{C}$ . Верхняя кривая – при сохранении современного уровня генерации  $\text{CO}_2$ . В этом случае рост температуры идет гораздо быстрее и достигает  $150^\circ\text{C}$  к 2700 г. (за 700 лет).

Приведенные здесь долговременные прогнозы глобального потепления неутешительны и похожи на начало климатической катастрофы, которая может превратить Землю в подобие Венеры. Но не все согласны с такими предсказаниями.

## **7.8. Организации, занимающиеся проблемой глобального потепления**

Основные международные организации, занимающиеся климатом Земли это Всемирная метеорологическая организация (ВМО, WMO) и Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП, UNEP, United Nations Environment Programme). ВМО является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций. Это авторитетный источник ООН по вопросам состояния атмосферы Земли, океанов и климата. Основной целью ЮНЕП является организация и проведение мер, направленных на защиту и улучшение окружающей среды. Её деятельность включает в себя различные проекты в области атмосферы Земли, морских и наземных экосистем.

В область интересов обеих организаций входит проблема глобального потепления и изменения климата, но она является лишь небольшой долей их обширной тематики. Ни для ВМО, ни для ЮНЕП глобальное потепление не является приоритетным направлением.

В 1988 г. совместным решением ВМО и ЮНЕП была учреждена уже упоминавшаяся выше Межправительственная группа

экспертов по изменению климата – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Позднее создание IPCC было одобрено Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций. На сегодняшний день IPCC представляет собой гибрид между научным органом и межправительственной политической организацией.

IPCC было поручено проведение обзора рецензируемой научной литературы и других соответствующих публикаций для предоставления информации о состоянии знаний об изменении климата. IPCC не проводит собственных оригинальных исследований. Группа готовит всеобъемлющие оценки, доклады по специальным темам и методологиям. Эти оценки основаны на предыдущих докладах и отражают самые последние знания.

Согласно «принципам, регулирующим работу IPCC», группа оценивает:

- риск глобального потепления;
- его потенциальные последствия;
- возможные варианты борьбы с ним.

Помимо основных обзорных докладов IPCC публикует доклады по отдельным тематикам.

Проблемами изменения климата занимаются также ряд других межправительственных организаций, но в очень специфических аспектах. Например, Управление Верховного комиссара ООН по правам человека занимается проблемой изменения климата, как возможной причины нарушения прав человека на жизнь, на питание, на воду и на здоровье.

## **7.9. Противодействие**

Существует несколько возможных путей противодействия глобальному потеплению.

### **7.9.1. Ограничение выбросов парниковых газов в атмосферу**

#### **Международные договоры.**

Поскольку идущее сейчас глобальное потепление вызвано в основном техногенными выбросами парниковых газов в атмосферу, то прямым путем противодействия потеплению является ограни-



чение выброса этих газов.

Основным документом по этому поводу до 2015 г. был Киотский протокол – международное соглашение, заключённое с целью сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу Земли. Протокол является дополнительным документом к Рамочной конвенции ООН об изменении климата 1992 года. Главная цель соглашения – стабилизировать концентрацию парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему планеты.

Киотский протокол применяется к шести парниковым газам: углекислому газу ( $\text{CO}_2$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ), закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), гидрофторуглеродам, перфторуглеродам и гексафториду серы ( $\text{SF}_6$ ).

В 2015-2016 гг. его заменило Парижское соглашение – договор в соответствии с Рамочной конвенцией ООН об изменении климата, регулирующий меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 г. Целью соглашения (согласно статье 2) является «активизация осуществления» Рамочной конвенции ООН по изменению климата, в частности, удержание роста глобальной средней температуры «намного ниже»  $2^\circ\text{C}$  и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной  $1.5^\circ\text{C}$ . Участники соглашения объявили, что пик эмиссии  $\text{CO}_2$  должен быть достигнут «настолько скоро, насколько это окажется возможным».

Страны-участники определяют свои вклады в достижение декларируемой цели в индивидуальном порядке, пересматривают их раз в пять лет.

Следствием Парижского соглашения являются планы отдельных стран по отказу от ископаемого топлива. Так ЕС ставит целью стать независимыми от углеводородного сырья к 2050 г., а от угля отказаться к 2030 г. В России провозглашен отказ от ископаемого топлива к 2060 г.

### Проблемы с ограничением выбросов.

Существуют, по крайней мере, две проблемы с этим путем противодействия глобальному потеплению.

Во-первых, нерегулярность исполнения странами своих обязательств по Парижскому соглашению. Оно не предусматривает

каких-либо санкций в случае недостижения сторонами декларируемых ими целей. На исполнение соглашения влияют политические и экономические события. Пример – возврат части стран Евросоюза к угольной энергетике зимой 2022–2023 гг. Переход к безуглеродной энергетике требует очень больших финансовых вложений в ближайшее десятилетие, что будет по силам не всем странам, деклариовавшим такой переход. Сюда же относятся завышенные требования, декларируемые в Парижском соглашении. Экспертные заключения говорят, что сегодня уровень потепления меньше 1.5 °C практически недостижим, а вероятность удержания этого уровня ниже 2 °C лишь около 20%.

Вторая проблема этого способа противодействия глобальному потеплению – наличие природных каналов поступления парниковых газов в атмосферу с положительной обратной связью по температуре. Например, выделение CO<sub>2</sub> из вод океанов при повышении температуры, рассмотренный в разделе 7.5.2.

Если поток CO<sub>2</sub> из океана превысит техногенный, то даже полный переход на безуглеродную энергетику не прекратит рост содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере и глобальное потепление.

### 7.9.2. Геоинженерия

Геоинженерия – комплекс мер, направленных активное противодействие изменению климатических условий и глобальному потеплению и получения комфортных условий для проживания и экономической деятельности. Геоинженерия может быть локальной, региональной или распространяться на всю Землю.

К геоинженерным относится ряд очень разнородных проектов:

- распыление аэрозолей в стратосфере (например, SO<sub>2</sub>) с целью уменьшения потока солнечного излучения, достигающего поверхности Земли;
- использование «прохладных крыш» на зданиях и сооружениях для отражения солнечного излучения;
- увеличение альбедо Земли за счет создания искусственных облаков путем впрыскивания в атмосферу морской воды.

- увеличение диаметра орбиты Земли с помощью «гравитационного буксира» или мощного взрыва;
- насыщение океана ионами железа для стимулирования фитопланктоном фотосинтеза процесса, в котором поглощается  $\text{CO}_2$ .
- Создание биоугля – искусственного угля (углерода) путем пиролиза биомассы для дальнейшего его захоронения;
- очистка воздуха от углеродосодержащих соединений;
- увеличение биомассы почвы и наращивание растительной в сухих зонах.

Проекты не очень проработаны и надежны, не складываются в единую концепцию. Многие из них имеют побочные эффекты. Почти ни один из перечисленных проектов не позволяет преодолеть сильное глобальное потепление.

### 7.9.3. Космический солнечный зонтик для Земли

Самый радикальный метод остановить глобальное потепление и даже климатическую катастрофу на любой стадии – понизить поток солнечного излучения, падающего на Землю.

Для этого можно разместить между Солнцем и Землёй зеркальный или поглощающий экран. Возможно несколько вариантов его конструкции:

- экран может быть сплошным и располагаться вблизи точки либрации L1 в системе Солнце-Земля;
- рой экранов произвольного размера может обращаться вокруг точки L1 системы Солнце-Земля по «галло» или «Лиссажу» орбитам;
- рой экранов может обращаться по низким орбитам вокруг Земли.

У каждого варианта есть недостатки и достоинства. Сплошной экран должен иметь диаметр, сравнимый с диаметром Земли, это очень сложное инженерное сооружение. Недостатком роя небольших экранов является перекрытие или друг друга. Для достижения того же ослабления света Солнца суммарная площадь небольших экранов должна быть больше площади одного сплошно-

го. У роя вокруг Земли экраны, находящиеся над её ночной стороной, не работают, поэтому их число надо удвоить.

## 7.10. Над чем работать

Проблема климатической опасности на сегодня еще слабо разработана. Консенсус в ней достигнут практически только по двум вопросам: наличие глобального потепления, повысившего среднюю температуру Земли на 1.0–1.5 °C за XX–XXI века, и повышение содержания в атмосфере парниковых газов, концентрация которых в разы превышает их максимальные концентрации за очень большой период времени в прошлом. В остальных вопросах очень много разногласий. Как быстро будет нарастать глобальное потепление? Будет ли оно происходить и как будет идти через сотни лет? Какие последствия вызовет глобальное потепление в сельском хозяйстве, промышленности, экологии, социальной сфере? Возможна ли на Земле парниковая катастрофа? Как можно бороться с потеплением Земли?

Наличие такого широкого круга нерешённых вопросов и разнообразие мнений по ним указывает на то, что проблемы изменения климата Земли находятся ещё на ранней стадии изучения, когда накапливаются факты, формулируются основные гипотезы, и только складываются в полноценную отрасль современной науки.

Несмотря на это, развитие этой области, по-видимому, идёт в правильном направлении. Перечислим некоторые направления работы, в которых, по мнению авторов, роль геофизиков, астрономов и планетологов должна быть весьма большой:

- уточнение энергетического баланса Земли;
- оценка характерных времен климатических изменений;
- разработка математического аппарата и создание моделей изменений климата Земли на больших интервалах времени (десятилетия и больше);
- оценка эффективности мер противодействия глобальному потеплению;
- уточнение климатической истории Венеры и Марса, а также других планет и спутников по мере появления необходимых

- данных о них;
- сравнительный анализ и предварительная разработка проектов солнечных зонтиков для Земли.

### Благодарность.

При написании этой главы М.Е. Прохоровым были использованы материалы курса лекций, прочитанных А.В. Карнауховым в 2020 г. студентам астрономического отделения физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

### *Литература к разделу*

- 7.1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3934600?ln=ru> (дата обращения 01.09.2023)ю
- 7.2. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://digitallibrary.un.org/record/3893122?ln=ru> (дата обращения 01.09.2023).
- 7.3. Trenberth K.T., Fasullo J., Kiehl J.T. Earth's global energy budget. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2009. V. 90. P. 311-323.
- 7.4. Как будет выглядеть наша планета, если все ледники на Земле растают. Zagge.ru, 2017. URL: <https://zagge.ru/esli-vse-ledniki-na-zemle-rastayut/> (дата обращения 01.09.2023).
- 7.5. Nakajima S., Hayashi Y.-Y., Abe Y. A Study on the "Runaway Greenhouse Effect" with a One-Dimensional Radiative-Convective Equilibrium Model. J. Atm. Sci. 1992. V. 49. No 23. P. 2256-2265.
- 7.6. Мартынов Г. Сестра Земли. – М.: ДетГИЗ, 1959. – 348 с.

## 8. ПРОБЛЕМА ТЕМНОГО И СПОКОЙНОГО НЕБА

### 8.1. Общие сведения

В последние годы большое внимание в мире уделяется проблеме влияния технологий на перспективы развития астрономических наблюдений с поверхности Земли и из околоземного космического пространства. Эта проблема, получившая название проблемы тёмного и спокойного неба (Dark and Quiet Sky, D&QS) имеет глобальный характер. Этой проблеме было посвящено несколько недавних крупных международных конференций и совещаний. Одной из самых представительных стала конференция «Тёмное и спокойное небо науке и обществу», которая была проведена в режиме онлайн 3–7 октября 2021 г., а также совместные совещания астрономов и экспертов из космической индустрии. По результатам этих конференций опубликовано и находится в открытом доступе несколько сборников (см., например, [8.1, 8.2]).

К сожалению, Россия пока что остается несколько в стороне, и её вклад в общую активность незначителен. Отчасти это связано с недостаточной информированностью российских специалистов и лиц, ответственных за принятие решений, с сутью проблемы и с её нарастающей остротой.

В этом разделе обсуждаются научно-технические и, отчасти, организационные аспекты проблемы тёмного и спокойного неба.

Выделяют три категории искусственных помех, отрицательно влияющих на астрономические наблюдения:

- а) искусственное освещение в ночное время;
- б) оптические и ИК следы на астрономических приёмниках излучения от спутников на низких околоземных орбитах;
- с) передача радиосигналов наземными и космическими излучателями, особенно со спутников на низкой околоземной орбите.

## 8.2. Проблема искусственного освещения в ночное время

Помехи астрономическим наблюдениям от искусственного освещения в ночное время (в англоязычной литературе обычно используется аббревиатура ALAN – Artificial Light at Night) обсуждается мировым астрономическим сообществом уже не менее двух десятков лет, а на локальном уровне гораздо дольше. Она стала острой в связи с появлением светодиодов, особенно излучающих интенсивный синий свет. Международный астрономический союз (МАС) установил рекомендуемый максимально допустимый порог светового загрязнения для мест расположения астрономических объектов на 10 процентов выше естественного фонового уровня. Поэтому обсудим понятие естественного фона, тем более, что это необходимо знать каждому астроному. В табл. 8.1 приведены составляющие фона неба согласно [8.3].

Таблица 8.1. Средние вклады в естественную яркость ночного неба в зените для широты 40° с.ш.

Компонент	Яркость (нВт м <sup>-2</sup> ср <sup>-1</sup> )	Вклад (%)
Свечение атмосферы	165	47.7
Зодиакальный свет	95	27.5
Звёздный свет	75	21.7
Диффузный галактический свет	10	2.9
Внегалактический фон	0.8	~0.2

В астрономии рассматривается фоновое излучение с 1 кв. секунды неба. Считается, что яркость ночного неба на обсерватории, расположенной в лучшем для астрономическом наблюдений месте составляет в полосе V около 22<sup>m</sup>/кв.сек. Используя он-лайн сервис The World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness для расчета яркости ночного неба<sup>8</sup>, можно оценить среднюю яркость в различных местах нашей планеты. На рис. 8.1 приведен пример использования этого сервиса.

<sup>8</sup> <http://www.lightpollution.it/worldatlas/pages/fig1.htm>

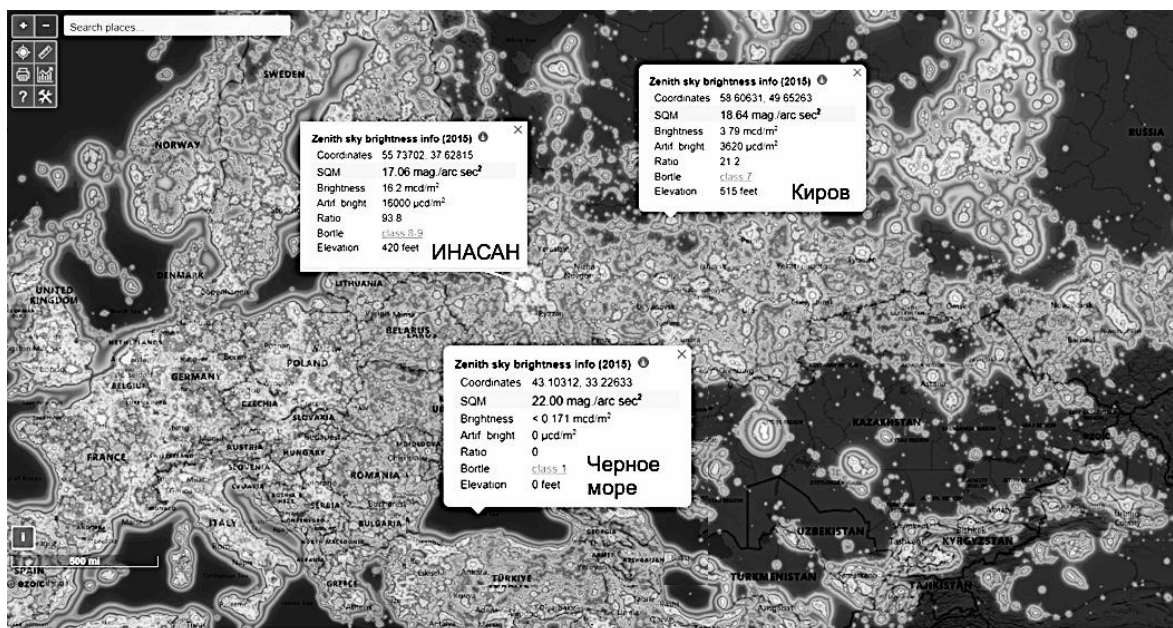


Рис. 8.1 Яркость ночного неба в избранных местах нашей планеты.

Как видно из табл. 8.1, естественное свечение атмосферы на указанной широте создаёт почти половину фона. Выход за пределы атмосферы уменьшает фон, но не так сильно, как обычно представляют. Здесь существенный вклад в фоновую засветку вносит зодиакальный свет, создаваемый рассеивающим излучение Солнца околосолнечным пылевым диском. Фоновая яркость существенно зависит от углового расстояния до Солнца. На рис 8.2 показано распределение яркости зодиакального света в видимом диапазоне согласно [8.4]. Оно существенно неоднородно, фоновая яркость принимает минимальные значения в области полюсов эклиптики. Распределение яркости звёздного фона (третья строка в табл. 8.1) также неоднородно. Звёздный фон создается звёздами Галактики и естественно дает наименьший вклад в области галактических полюсов. В целом, встречающееся в литературе минимальное значение фоновой яркости в 25<sup>m</sup> на квадратную угловую секунду может встречаться лишь в весьма ограниченных областях небесной сферы.

Уровень светового загрязнения во всем мире ежегодно возрастает на 2–6 процентов (см. документ ООН A/АС.105/C.1/L.396, и многие места расположения обсерваторий уже находятся в зонах неприемлемо высокого светового загрязнения.



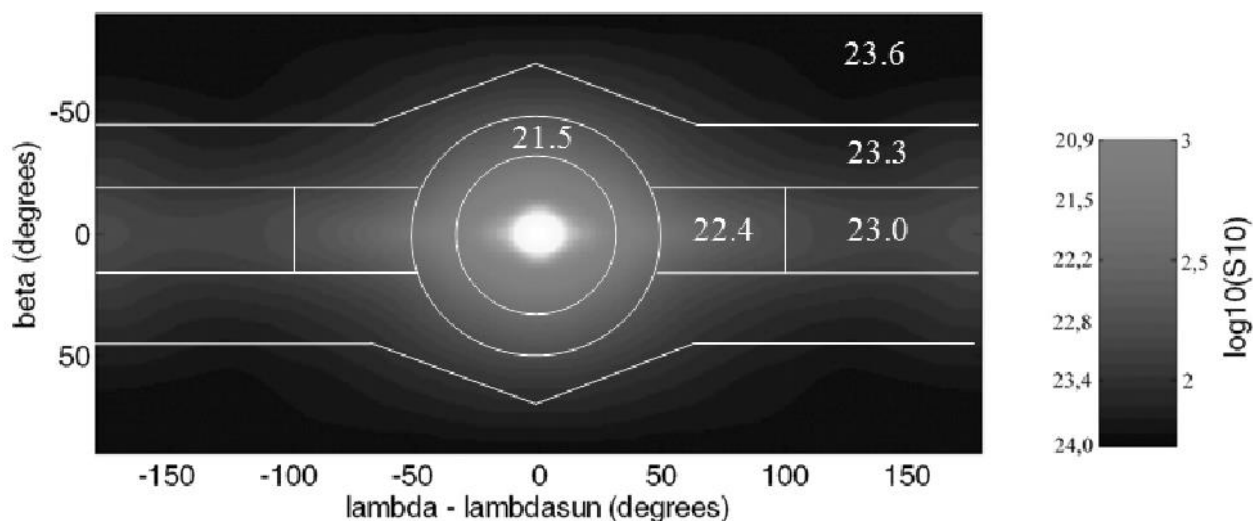


Рис. 8.2. Распределение яркости зодиакального света в видимом диапазоне в эклиптических координатах согласно [8.4]. Числа на рисунке – яркость в звёздных величинах на квадратную угловую секунду.

Помимо влияния на астрономию, искусственное освещение в ночное время может оказывать значительное биологическое воздействие на флору и фауну. Вредное воздействие ALAN значительно больше для синей компоненты света. Согласно представлениям медиков, синий свет подавляет выработку мелатонина. Наша биологическая система сбалансирована так, чтобы подавлять выработку мелатонина в течение дня, позволяя при этом вырабатывать его в тёмные часы ночи. Поскольку мелатонин может играть определённую роль в подавлении раковых опухолей, синий свет ночью может способствовать увеличению риска для здоровья. В мире как раз отмечается рост производства экономичных светодиодных (LED) ламп, имеющих значительную синюю ( $\lambda < 500$  нм) компоненту излучения. На рис. 8.3 показан спектр ламп COB Citizen (адаптирован с сайта <https://cobkits.ru/products/37651892>). Цифры возле кривых на рисунке примерно соответствуют цветовой температуре (в тысячах градусов). Синий пик хорошо виден даже в спектрах ламп с низкой цветовой температурой.

Экономика определяет многое, если не всё. Было довольно много попыток использовать даровой солнечный световой поток для освещения больших площадей на Земле (особенно в северных районах) с помощью размещенных в космосе гигантских зеркал.

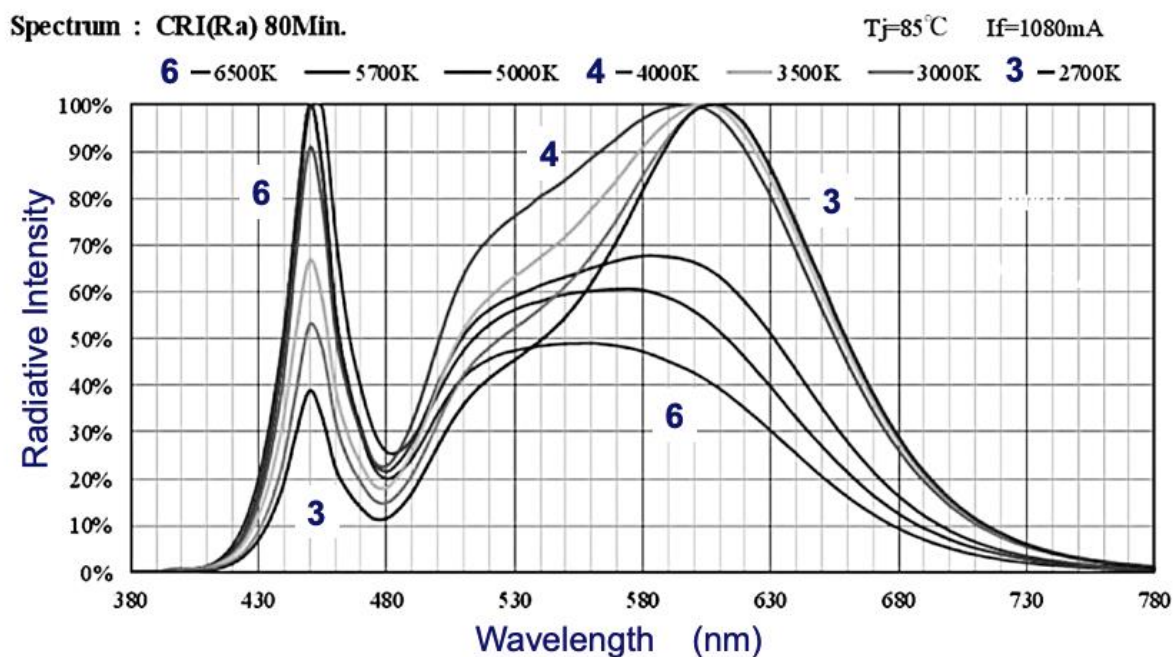


Рис. 8.3. Распределения энергии в излучении ламп COB Citizen.

Такой проект («Знамя») был и в России. Планировалось добиться освещения в пятне диаметром 7–8 км интенсивностью в 5–10 раз выше освещения от полной Луны. Таким «солнечным зайчиком» можно было бы управлять, перемещая его или подолгу удерживая на месте. Эксперимент был проведен в 1993-94 гг. Первый пробный запуск в 1993 г. оказался удачным, но во время раскрытия зеркала на орбите в повторном эксперименте в 1994 г. произошёл сбой. Спутник затопили, а проект закрыли.

Помехи астрономическим наблюдениям от искусственного освещения в ночное время становятся (в ряде мест уже стали) острой проблемой. Упоминавшийся выше 10-процентный порог может быть достигнут в следующем десятилетии.

Астрономы пытаются решать эту проблему как на уровне МАС, так и на локальном уровне.

В России астрономы РАН и вузов также пытаются обратить внимание государственных органов на проблему. Вот фрагмент из декабрьского 2021 г. письма бывшего в то время Президентом РАН академика А.М. Сергеева в Минобрнауки и Министерство природных ресурсов и экологии РФ: *РАН проведена предварительная работа по анализу существующей ситуации в Российской Федерации, показывающая, что для ведущих астрономические*

*исследования организаций все большую остроту приобретают проблемы, связанные с активным освоением территорий вокруг обсерваторий и оказывающих негативное влияние на качество и возможность астрономических наблюдений. В то же время в нашей стране не существует никаких нормативных документов, ограничивающих хозяйственную деятельность на прилегающих к местам размещения этих научных инструментов территориях.....*

*Российская академия наук предлагает рассмотреть возможность внесения изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 17.03.2021 № 392 «Об утверждении Положения об охранной зоне стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением, ....», расширив понятие «стационарные пункты наблюдений за состоянием окружающей среды» на станции и обсерватории, осуществляющие наблюдение объектов и явлений в ближнем и дальнем космосе, геофизических свойств Земли, определив для них предельные размеры охранных зон, запреты на определенные виды хозяйственной деятельности.*

В последнее время есть признаки того, что российские органы власти начинают обращать внимание на обращения учёных, но успокаиваться нельзя.

### **8.3. Проблема влияния мега-созвездий ИСЗ на астрономические наблюдения**

Крупные группировки спутников (т. н. мега-созвездия) на низких орбитах представляют собой новую проблему для астрономии ввиду огромного количества ИСЗ, их высокой яркости на фоне неба (вследствие оптического отражения или теплового излучения), расположения повсюду в небе (по сравнению со спутниками на геостационарной орбите, находящихся в пределах одного «пояса»). Проблемы б) и с) из приведенного в разделе 8.1 списка все более обостряются в связи с интенсификацией запусков мега-созвездий ИСЗ. Примеры таких спутниковых созвездий, реализация которых идет полным ходом, известны всем. Это мега-созвездия Starlink, OneWeb, Amazon, Samsung и др., включая отечествен-

ный проект «Сфер»а.

По различным оценкам из Интернет-источников за три года с начала 2019 г. число активных спутников в околоземном пространстве (ОКП) увеличилось с ~2000 до ~10000 (см. раздел 5.1.1). Кроме того, в ОКП насчитывается ~3000 неактивных спутников. Согласно данным Международного союза электросвязи (МСЭ, международное название – ITU, International Telecommunication Union) и другим источникам, например [8.5], в ближайшее десятилетие на низкую околоземную орбиту могут быть выведены около 100 000 спутников, и несколько компаний уже приступили к созданию и запуску гигантских спутниковых группировок. В табл. 8.2 перечислены некоторые часто упоминаемые мега-созвездия ИСЗ и приведены их основные параметры: количество ИСЗ, диапазон высот, диапазон наклонений.

Таблица 8.2. Некоторые спутниковые мега-созвездия.

Название группировки	Диапазон высот км	Диапазон наклонений град.	Количество ИСЗ
Starlink Generation 1	335–560	42–97	11 926
Starlink Generation 2	328–614	30–148	30 000
Amazon Kuiper	590–630	33–52	3 236
OneWeb Phase 1	1200	88	1 980
OneWeb Phase 2 revised	1200	40–88	6 372
GuoWang GW-A59	508–1145	30–85	12 992
Общее количество			66 506

Основная цель этих спутниковых созвездий – обеспечить связь и Интернет с низкой задержкой в любом регионе земного шара. Хотя эти усилия могут принести огромную пользу обществу, влияние полностью развернутых созвездий на профессиональные астрономические наблюдения пока что не было должным образом изучено и учтено. Из-за низких орбит значительное число спутников может быть видно даже невооруженным глазом, особенно на малых высотах над горизонтом в сумерках и на рассвете.

Новые спутники будут ярче, чем 99% объектов, находящихся сейчас на орбите!

### 8.3.1. Оптический диапазон

В табл. 8.3 приведены типичные характеристики ИСЗ из мега-созвездий: блеск и приведенный размер. Типичные размеры спутников – несколько метров, а типичное альbedo  $\sim 0.25$ . Значения альbedo и размеров в табл. 8.3 приведены как оценочные (усредненные).

Таблица 8.3. Характеристики ИСЗ некоторых мега-созвездий ( $p$  – примерное альbedo;  $r$  – оценочный радиус).

Название ИСЗ	Рабочая высота (км)	Звёздная величина на рабочей высоте	Разброс звёздных величин	Звёздная величина на высоте 1000 км	$pr^2$ (м <sup>2</sup> )	$p$	$r$ (м)
Starlink original	550	4.6	0.7	5.9	0.085	0.25	0.58
		4.0	0.7	5.3	0.152	0.25	0.78
		4.2		5.5	0.125	0.25	0.71
Starlink DarkSat	550	5.1		6.4	0.056	0.08	0.71
Starlink VisorSat	550	6.2	0.8	7.5	0.023	0.25	0.30
OneWeb	1200	5.8	0.6	7.1	0.028	0.25	0.33
		7.6	0.7	7.2	0.027	0.25	0.33

Структура и отражающие свойства конкретных ИСЗ сложны. На рис. 8.4. показан как пример технический облик космического аппарата Starlink. Согласно [8.6] КА Starlink – это тонкая прямоугольная шина  $3.0 \times 1.5 \times 0.2$  м, изготовленная в основном из алюминия со многими конструктивными особенностями, такими как двигатели и плоские антенны, обращенные к надиру, и большая (длинная) солнечная панель, состоящая из 12 сегментов  $3.0 \times 0.8$  м каждый. Доступная информация о массе дает оценку в  $\sim 260$  кг. На центральной панели рис. 8.4 основной корпус КА показан в двух

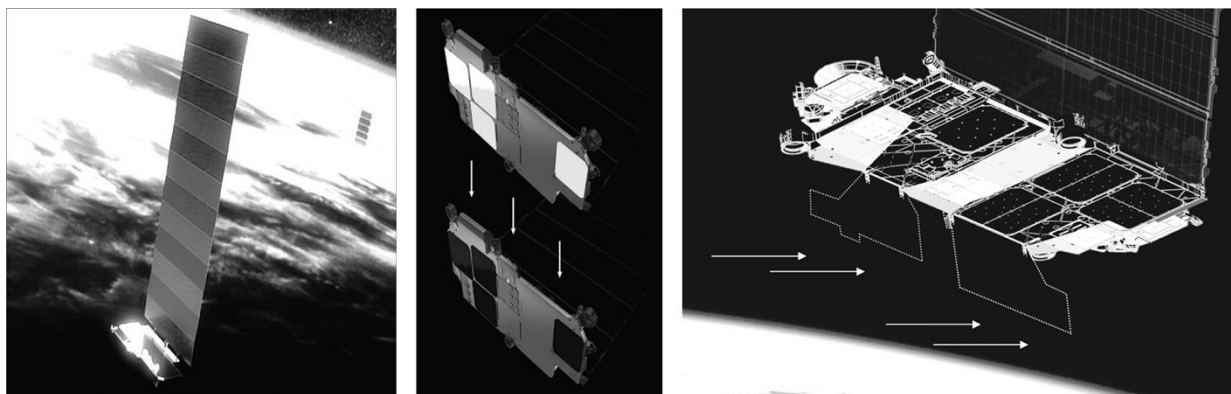


Рис. 8.4. Слева – общий вид КА Starlink. В центре – корпус КА в двух вариантах: обычный (вверху) и Darksat (внизу). Справа – вариант КА Vizorsat.

вариантах: обычном (вверху) и Darksat (внизу). Модификация Darksat была реализована корпорацией SpaceX в ответ на обращения астрономов с просьбой уменьшить отражательную способность КА в оптическом диапазоне. Darksat отличается тёмным покрытием на панелях антенн, обращенных к надиру, которые ранее были белыми. Для Darksat альбедо  $\sim 0.08$ . Тёмное покрытие уменьшает отраженный свет, видимый наблюдателям на Земле. Однако в последнее время большее предпочтение отдано показанному на правой панели варианту Vizorsat (КА со светоблокирующими козырьками). Согласно [8.6] введение козырьков позволило существенно снизить блеск КА. На рис. 8.5 показаны гистограммы наблюдаемого блеска стандартного КА Starlink, варианта Vizorsat и КА OneWeb.

Звёздная величина ИСЗ зависит не только от параметров самого КА, но и от расстояния между наблюдателем и ИСЗ, и от условий освещенности. На рис. 8.6 показаны наблюдаемый блеск ИСЗ Starlink в зависимости от расстояния до наблюдателя ([8.7]). Наблюдения проводились в Аризоне на мобильном роботе телескопе Pomenis апертурой 180 мм, с полем зрения 4.2 градуса. Теоретические кривые получены с использованием упрощенной модели сферы Ламберта для двух высот. Неизвестный фазовый угол Солнца вносит свой вклад в разброс измерений.

Количество следов ИСЗ в кадре зависит от параметров камеры, длительности экспозиции, параметров группировки ИСЗ и

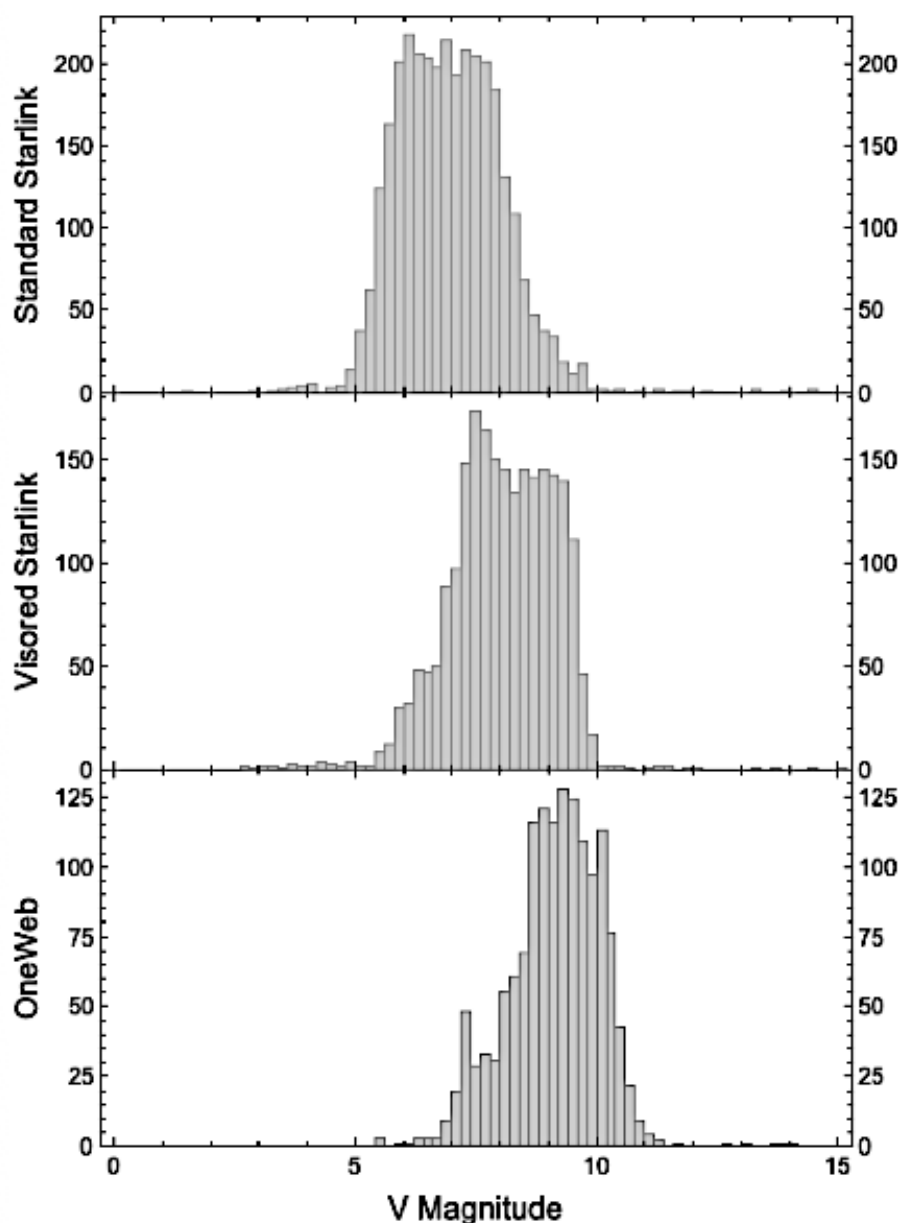


Рис. 8.5. Гистограммы наблюдаемого блеска стандартного КА Starlink, варианта Vizorsat и КА OneWeb [8.6].

условий видимости. Условия видимости зависят, естественно, от конфигурации группировки ИСЗ, от даты и времени наблюдений и от географической широты обсерватории. На рис. 8.7 показаны типично представляемые конфигурации мега-созвездий OneWeb и Starlink [8.8].

Конечно, детальная конфигурация выглядит сложнее. ИСЗ запускаются группами по различным орбитальным плоскостям

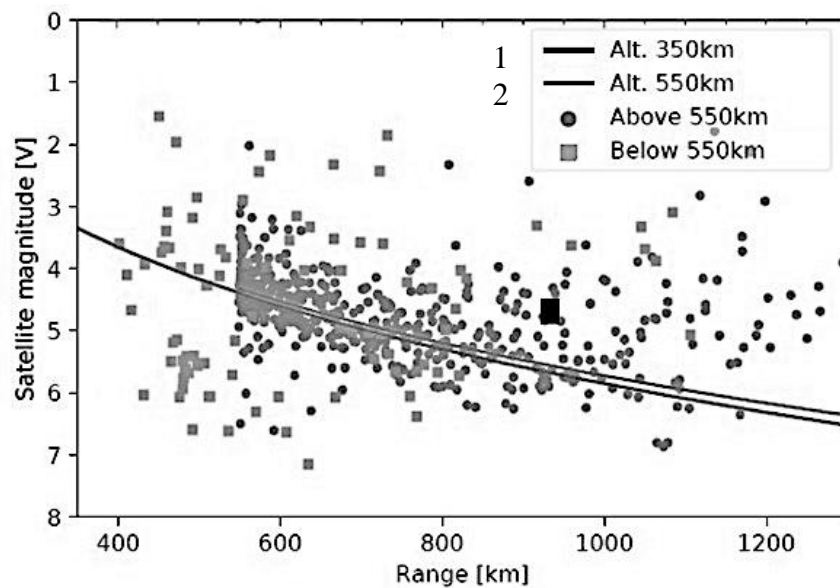


Рис. 8.6. Блеск ИСЗ Starlink в зависимости от расстояния между наблюдателем и ИСЗ. Линии получены с использованием упрощенной модели сферы Ламберта для двух высот [8.7].

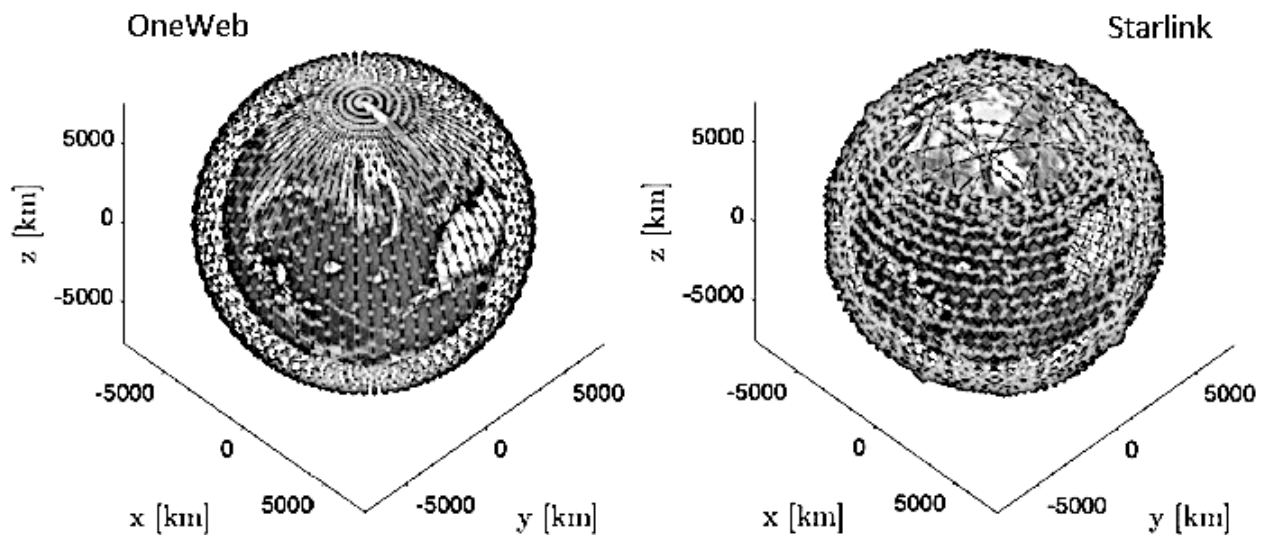


Рис. 8.7. Примерный вид конфигураций мега-созвездий Starlink и OneWeb.

и/или по различным оболочкам.

Для мега-созвездий количество ИСЗ, находящихся над горизонтом в данной местности, примерно постоянно, т. к. большое количество ИСЗ с квазиравномерным распределением по небесной сфере усредняют общую картину. Какая часть всего населения



ИСЗ находится над горизонтом, зависит от высоты орбиты. В табл. 8.3 приведены оценки относительного числа ИСЗ, находящихся над горизонтом или имеющих высоту  $h > 10^\circ$  над горизонтом (наблюдения на более низких высотах, как правило, сильно затруднены) от их общего числа.

Таблица 8.3. Параметры видимости мега-созвездий ИСЗ.

Высота орбиты ИСЗ, км	Доля ИСЗ над горизонтом, %	Доля ИСЗ при $h >$ $10^\circ$ , %
350	2.6	0.9
550	4.0	1.8
780	5.5	3.2
1200	7.9	4.3
1325	8.6	5.0
2000	11.9	7.0

Как видно из этой таблицы, при полном развертывании спутниковых созвездий число находящихся одновременно над горизонтом ИСЗ может достигать нескольких тысяч. Это может создать серьезные помехи и перед наземной астрономией и даже для космических телескопов на низких околоземных орбитах.

Для оптических наблюдений важно не вообще количество ИСЗ над горизонтом, а количество освещённых Солнцем ИСЗ. ИСЗ, не освещённые Солнцем, не создают оптических помех. Условия освещения зависят от времени года и широты места наблюдения. На рис. 8.8 (адаптирован с сайта <https://www.eso.org/ohainaut/satellites/>) показано, как на момент равноденствия в течение ночи в географическом пункте с широтой  $50^\circ$  (Благовещенск, Брюссель и т.д.) изменяется количество освещённых ИСЗ группировок Starlink и OneWeb (промоделирован вариант с 48 тыс. КА). Особо выделена динамика количества ярких ИСЗ ( $<5-6^m$ ). Хорошо видно, что наибольшее количество ИСЗ будет видно в часы близ астрономических сумерек, а посередине ночи оно будет минимальным.

Довольно часто для иллюстрации серьёзности проблемы оптического загрязнения новыми созвездиями ИСЗ приводят кадр с

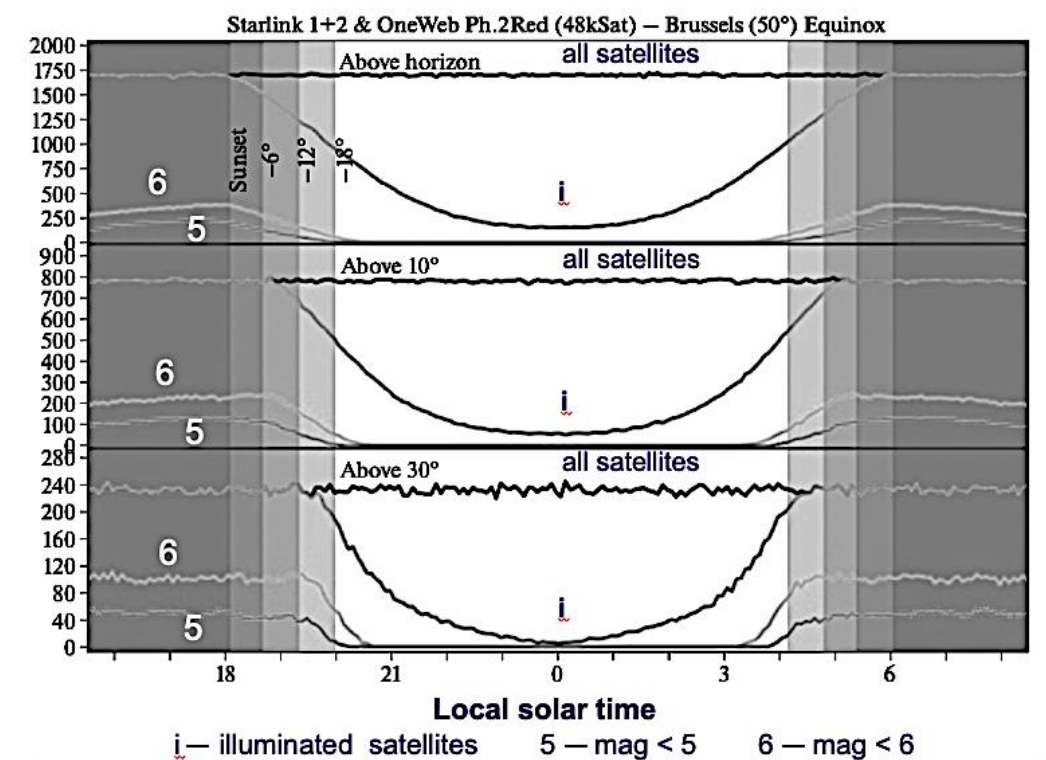


Рис. 8.8. Изменение количества освещенных ИСЗ группировок Starlink и OneWeb в течение ночи в географическом пункте с широтой  $50^\circ$  на момент равноденствия.

изображением группы галактик NGC 5353/4, сделанный в обсерватории Лоуэлла в Аризоне (США) в ночь на 25 мая 2019 г. Диагональные линии показывают 25 из 60 недавно (на тот момент) запущенных спутников Starlink. Эта «ужасающая» картина показана на рис. 8.9. Однако нужно иметь в виду, что плотность следов и блеск спутников значительно выше в первые дни после запуска (как показано здесь), пока ИСЗ находятся на парковочных орбитах. В последующем блеск спутников будет уменьшаться по мере достижения их конечной орбитальной высоты. Так что этот случай не показателен.

Считается, что для большинства классических узкопольных астрономических телескопов проблема светового загрязнения мега-созвездиями не столь остра. Мешающее воздействие заметнее для телескопов с большим полем зрения, таких как инструменты для обнаружения движущихся объектов, например, инструменты поддерживаемой ООН Международной сети предупреждения об опасных астероидах (IAWN). По оценкам [8.9, 8.10], до



Рис. 8.9. Изображение группы галактик NGC 5353/4, сделанное в обсерватории Лоуэлла в Аризоне в ночь на 25 мая 2019 г. Диагональные линии показывают 25 из 60 недавно (на тот момент) запущенных спутников Starlink.

30–40% снимков, сделанных с помощью самого крупного доступного ученым на данный момент обзорного оптического телескопа Pan-STARRS (США) или такого широкоугольного телескопа как будущий обзорный телескоп LSST, может оказаться непригодным для использования. LSST— это 8-м обзорный телескоп с очень большим полем зрения, который находится в обсерватории имени Веры Рубин (США), и который должен заработать в ближайшее время. На рис. 8.10 приведена проекционная карта Моллвейде всего неба, показывающая полосы следов, которые ИСЗ созвездия Starlink могло бы сделать за 10-минутную экспозицию в случайно выбранную дату (11 октября 2022 г.) сразу после вечерних сумерек при наблюдениях на телескопе LSST. Зенит находится в центре, север вверху, а восток слева. Изображения следов сгруппированы, потому что группы ИСЗ заполняют орбитальные плоскости. Область, свободная от следов, обусловлена тенью Земли. Серые области (овал) находятся ниже горизонта. Исследователи (см., напр., [8.11]) обнаружили, что, как и ожидалось, широкопольная спектроскопия будет затронута помехами на более низком уровне; лишь до 15% кадров, сделанных в начале и в конце ночи, будут испорчены.

В случае узкопольных инструментов проблема, конечно же,

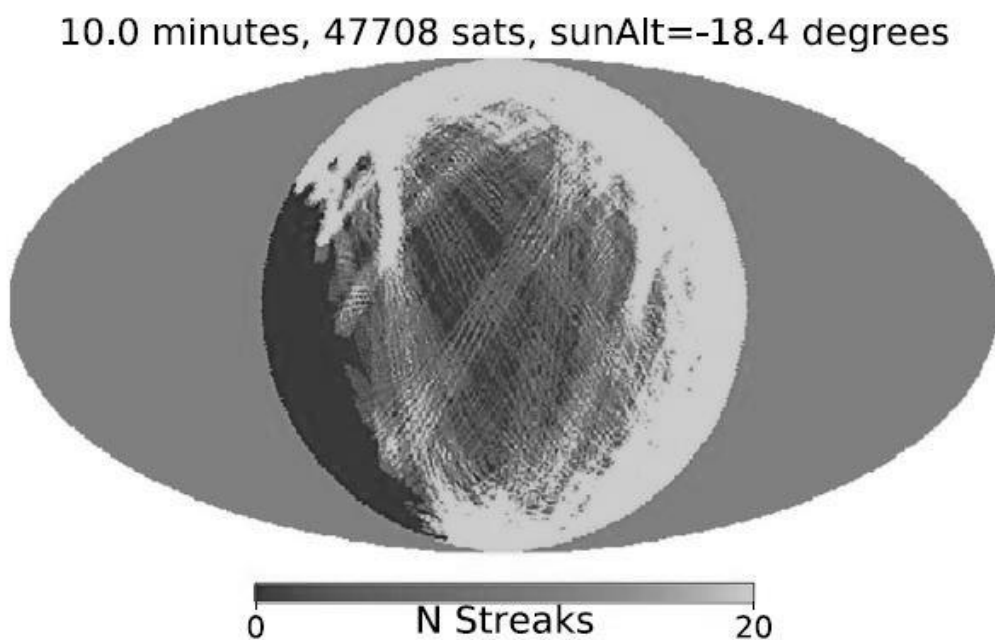


Рис. 8.10. Количество полос (следов ИСЗ), которые созвездие Starlink могло бы оставить в кадре на телескопе LSST за 10-минутную экспозицию в случайно выбранную дату (11 октября 2022 г.) сразу после вечерних сумерек [8.9].

не так остра, но даже и в этом случае в некоторых условиях может проявиться световое загрязнение следами ИСЗ. На рис. 8.11 (из [8.7]) показана карта неба с количеством следов ИСЗ, оставленных за экспозицию 5 мин в кадре узкопольной камеры (поле зрения  $6'$ ). Тонкие белые круги обозначают высоту  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $60^\circ$ , точка зенита находится в центре круга. Широта обсерватории  $50^\circ$ ; высота Солнца – минус  $18^\circ$  (астрономические сумерки). В чёрной области на юго-востоке спутники находятся в тени Земли. Полосы, идущие с северо-востока на юго-запад, соответствуют оболочкам созвездий на более низких высотах, юго-восточные части которых уже находятся в тени. Резкие линии, идущие с востока на запад, соответствуют краям оболочек созвездий, наклоны которых близки к широте обсерватории.

Количество следов – лишь одна из характеристик. Важна ещё ширина следа. Если она существенно шире одного пикселя, то, соответственно, число «засвеченных» пикселей может быть большим. В современных оптических системах размеры оптического пикселя (определяется качеством оптики) и пикселя приемника излучения согласованы. Но это выполняется только для наблюдений

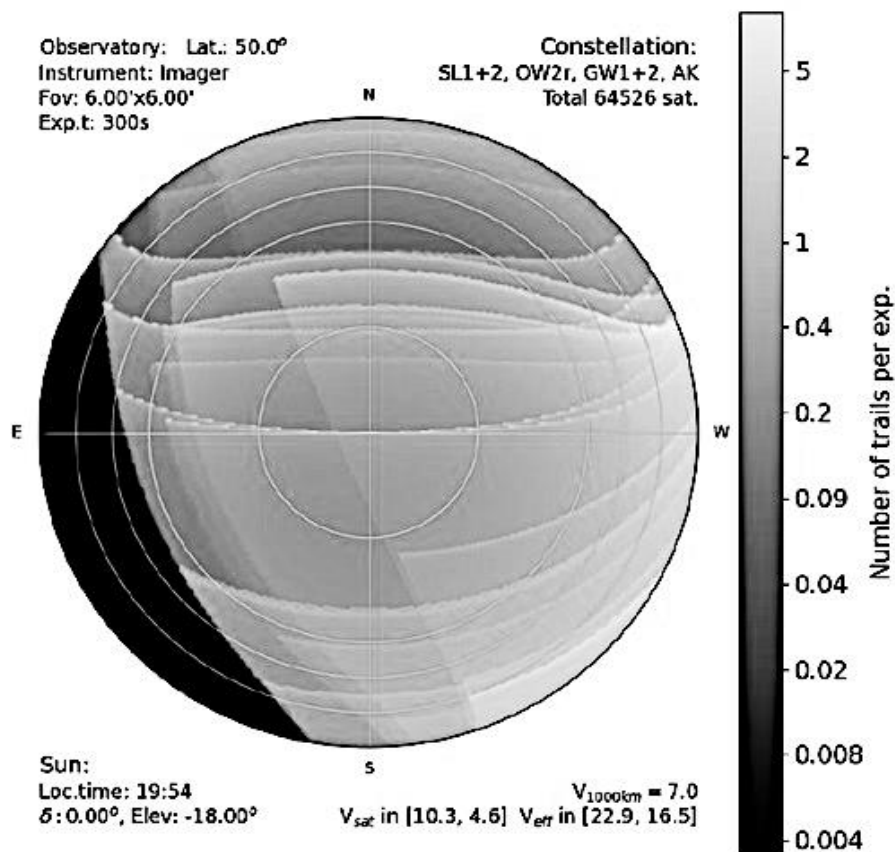


Рис. 8.11. Количество следов ИСЗ, оставленных за экспозицию 5 мин в кадре узкопольной камеры (поле зрения 6'), сделанном в момент астрономических сумерек. Широта обсерватории 50°. Другие детали описаны в тексте.

(бесконечно) далеких источников. Для достаточно длиннофокусных современных телескопов ИСЗ, находящиеся на расстояниях в сотни километров, оказываются «не в фокусе». Даже для камер с коротким фокусом такая ситуация имеет место, если наблюдаются близкие объекты (например, метеоры). Кроме того, собственно угловой размер объекта может быть вполне заметным, т. е. объект уже нельзя считать точечным.

Для оценки эффективного углового размера изображения ИСЗ  $\theta_{eff}$  можно применить оценочную формулу (см. [8.12]).

$$\theta_{eff}^2 = \theta_{atm}^2 + \frac{D_{satellite}^2 + D_{mirror}^2}{d^2}, \quad (8.1)$$

где  $\theta_{atm}$  – атмосферное качество изображения (seeing),  $D_{satellite}$  – размер ИСЗ,  $D_{mirror}$  – диаметр главного зеркала телескопа,  $d$  – расстояние до ИСЗ. На рис. 8.12 показана зависимость углового размера (FWHM – полуширины пика распределения энергии) изображения ИСЗ, полученного с помощью телескопа Subaru, от расстояния до ИСЗ и размера ИСЗ [8.13].

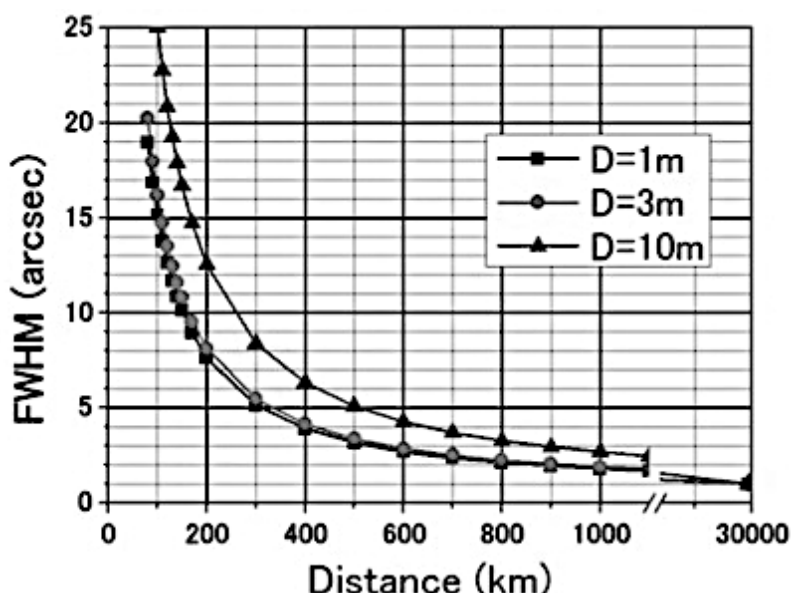


Рис. 8.12. Размер FWHM изображения относительно близкого объекта диаметром  $D$  на камере SuprimeCam (Subaru), полученный на телескопе с типичным видимости  $0.8''$  [8.13].

Подробный анализ возможных последствий для астрономических наблюдений на инструментах ESO выполнен в работе [8.5]. Проанализированы помеховые последствия для наблюдений на инструменте FORS2 (FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph), разработанном как многоцелевой инструмент для наблюдений в диапазоне рабочих длин волн от 330 до 1100 нм. FORS2 включает фокальный редуктор (поле зрения  $6.8'$ ) и спектрограф-камеру низкой дисперсии ( $R$  до 2800), а также мульти-объектный спектрограф.

Согласно результатам анализа возможных последствий для астрономических наблюдений на инструментах ESO, выполненном в [8.5], до 0.3% изображений FORS2 будут испорчены яркими спутниками (пиковое значение 2.7% во время астрономических сумерек). В среднем до 20% изображений будут включать в себя



более слабые спутниковые следы, каждый из которых затрагивает до 1.5% пикселей кадра. Кроме случая очень коротких экспозиций, эффект масштабируется в зависимости от времени экспозиции и размера поля зрения. Инструменты, попадающие в эту категорию, включают также EFOSC2 (La Silla), SPHERE, HAWK-I (Paranal).

В единственной (на момент написания книги) публикации в российском журнале научной статье по данной теме [8.14], предназначенной прежде всего российским астрономам, делается вывод, что проблема влияния мега-созвездий ИСЗ на астрономические наблюдения вполне реальна. Пока она не является критичной, но быстро растет. Что касается наблюдений в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, то негативный эффект спутниковых следов более существенен для широкопольных камер, в первые и последние часы ночи. Спектрографы с низким и средним разрешением подвержены меньшему помеховому воздействию, но помехи могут быть примерно на том же уровне, что и у полезный сигнал. Спектрографы с высоким разрешением, по сути, будут невосприимчивы.

### 8.3.2. Радиодиапазон

Как известно, весь радиодиапазон поделен в частотном отношении между различными группами пользователей. За радиоастрономами зарезервировано несколько участков. Частотные участки, выделенные для радиоастрономии, показаны вертикальными полосками на рис. 8.13. Стрелки указывают участки частот

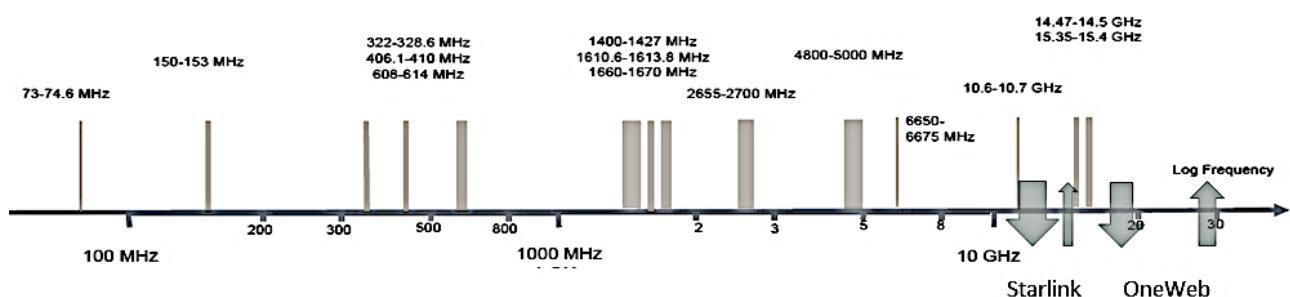


Рис. 8.13. Частотные диапазоны, выделенные для радиоастрономии (серые полоски). Стрелками показаны участки частот для радиосвязи со спутниками Starlink (левая пара стрелок) и OneWeb (правая пара стрелок).

для радиосвязи со спутниками Starlink (левая пара стрелок) и OneWeb (правая пара стрелок). Направления стрелок в каждой паре соответствуют направлениям передачи (downlink и uplink). В Starlink и OneWeb предполагается использовать Ку диапазон (10.7–12.7 и 14–14.5 ГГц) и Ка диапазон (17.8–19.3 и 27.5–30.0 ГГц). Формально участки для связи с ИСЗ и радиоастрономии разнесены. Однако самые амбициозные радиоастрономические проекты связаны с наблюдениями в широком диапазоне частот. Поэтому такие мега-проекты, как SKA, реализуются в так называемых радиоспокойных зонах (Radio Quiet Zone – RQZ). На рис. 8.14 проиллюстрирована картина радио излучений в различных местах (населенных пунктах) Австралии (взята из [8.1]). Австралия считается одним из лучших кандидатов для выделения RQZ. Вдали от

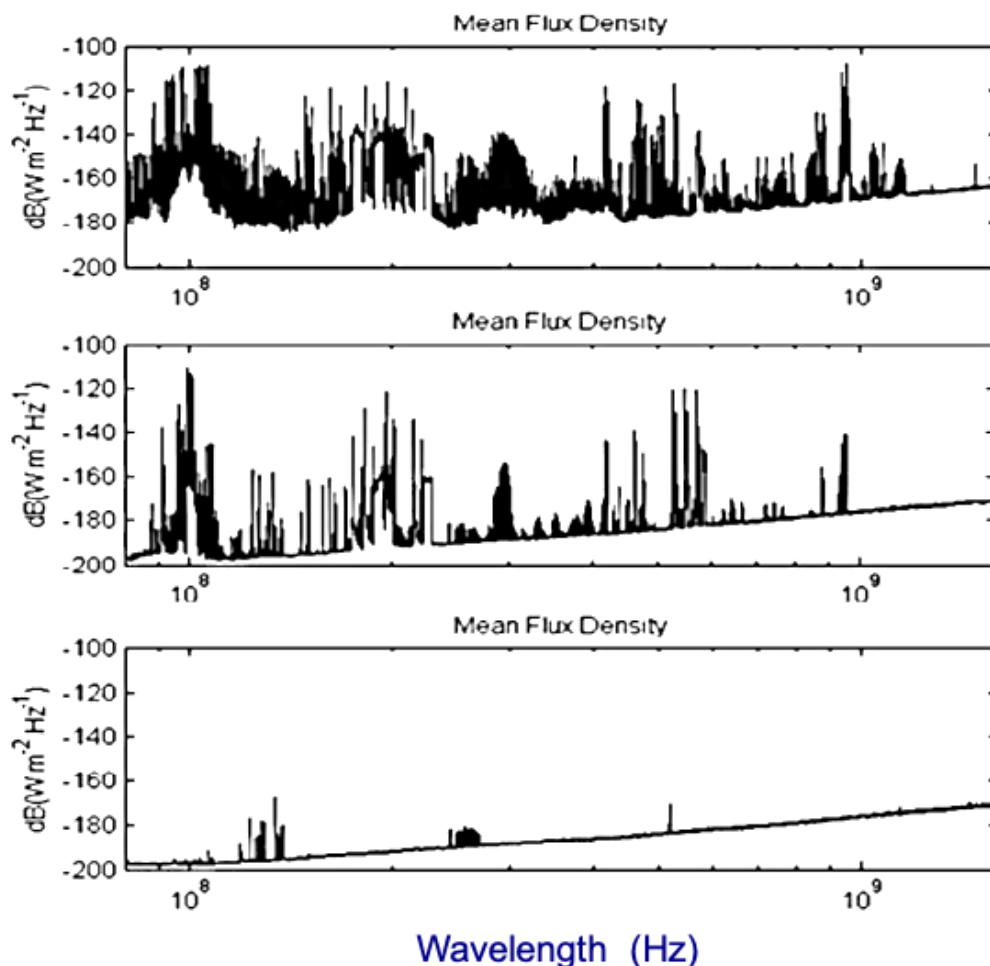


Рис. 8.14. Радиочастотный спектр в различных местах Австралии Сверху вниз – Сидней (6 млн жителей); Наррабри (около 6000 жителей), Мерчисон (менее 10 жителей).



населённых пунктов в Австралии есть места с весьма низкой ради-ошумовой составляющей.

RQZ зоны есть и в других наименее населённых регионах планеты, но с появлением мега-созвездий ИСЗ радиоспокойных зон не будет нигде на земном шаре. Радиоастрономы в других про-ектах также ведут наблюдения в RQZ и уже сталкиваются с про-блемами.

Излучение со спутников создает, например, проблемы для всех радиотелескопов и телескопов СМВ в Чили и на Южном по-люсе. Проблемой могут стать внеполосные и паразитные излу-чения и в защищенных радиоастрономических диапазонах. Боковые лепестки диаграмм направленности также будут создавать замет-ный фон. Так что суть проблемы радиопомех в том, что десятки тысяч ИСЗ из обсуждаемых коммуникационных спутниковых со-звездий будут активно излучать в радиодиапазоне. С 50 000 спут-никами на орбите в среднем один ИСЗ будет находиться (и излу-чать на Землю) в пределах  $1.3^\circ$  от линии наведения наземного ра-диотелескопа, где бы этот телескоп ни находился и куда бы он ни наводился. Кстати, примерная полуширина главных лепестков пе-редающих антенн ряда спутников составляет примерно такую же величину, так что ни один радиотелескоп не избежит влияния мега-созвездий.

Уже есть данные о том, что спутники Starlink и другие подоб-ные группировки спутников создают помехи на радиочастотах, на которых работают многие крупнейшие радиоастрономические об-серватории мира. Это говорит о необходимости защиты радиоте-лескопов от подобных помех. *"Используя телескоп LOFAR, нам удалось обнаружить радиоволны на частотах от 110 до 188 МГц для 47 из 68 спутников, за которыми мы наблюдали. В этот ин-тервал входит защищенный диапазон частот 150,05-153 МГц, выделенный под радиоастрономические наблюдения Междуна-родным телекоммуникационным союзом (ITU)",* – отметил науч-ный сотрудник Нидерландского института радиоастрономии (ASTRON) Сес Басса, чьи слова приводит пресс-служба немецкого Радиоастрономического института общества Макса Планка (MPIfR). (<https://nauka.tass.ru/nauka/18199383>).

## 8.4. Методы снижения остроты проблемы

Относительно конкретных технических рекомендаций можно отметить, что нет универсальных рецептов по смягчению последствий спутниковых следов для всех типов научных приборов и всех научных задач. Что касается конкретики выработанных рекомендаций, то они простые (по формулировке), но иногда противоречивые и даже взаимоисключающие.

В отношении наблюдений в оптическом диапазоне производителям ИСЗ, запускающим и эксплуатирующим организациям рекомендуется:

- делать спутники как можно более тёмными ( $V > 7^m$ );
- свести к минимуму общее количество спутников;
- выбирать предпочтительные высоты орбиты  $< 600$  км;
- управлять положением ИСЗ, чтобы не отражать свет на обсерватории;
- учитывать условия изменения видимости при орбитальных маневрах (сход, подъем и т.д.);
- предоставлять общедоступные данные высокой точности о местоположении спутника с тем, чтобы можно было оптимизировать программы наблюдений.

В отношении наблюдений в радиодиапазоне:

- избегать прямого освещения передатчиками ИСЗ радиообсерваторий (согласно результатам интенсивного обсуждения среди экспертов вряд ли возможно «сжечь» приемник на радиотелескопе, но прямая засветка приводит к сбою в настройках этих очень чувствительных и сложных устройств);
- придерживаться предельных значений эквивалентной плотности потока мощности, рекомендуемых МСЭ для электромагнитных помех.
- минимизировать внеполосные, паразитные излучения. Радиопередатчики на спутниках должны иметь уровни излучения в боковых лепестках достаточно низкие, чтобы не прямое освещение ими радиотелескопов и зон радиомолчания не создавало помех ни по отдельности, ни в совокупности.

Общая рекомендация вполне естественна. Она формулируется

просто – развивать сотрудничество астрономического и спутникового сообществ.

В разделе 8.1 отмечалось, что проблеме D&QS было посвящено несколько недавних крупных международных конференций и совещаний, и что тема стала одной из обсуждаемых на трибуне ООН. Международный астрономический союз учредил Центр по защите тёмного и спокойного неба от воздействия спутниковых группировок (IAU Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference), который приступил к работе на базе исследовательской лаборатории NOIRLab и обсерватории SKAO с 1 апреля 2022 г. Основная работа центра включает разработку программных инструментов для помощи астрономам, работу над национальной и международной политикой в сфере спутниковых группировок, работу с общественностью и промышленностью над технологиями для устранения воздействий спутников на астрономические наблюдения. Центр уже установил связь с Amazon, OneWeb и SpaceX.

К сожалению, Россия пока что остается несколько в стороне и ее вклад в общую активность незначителен. Но ситуация меняется. 18–21 апреля 2022 г. в Москве состоялась Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием «Околоземная астрономия – 2022». Конференция была организована Институтом астрономии РАН и Институтом космических исследований РАН. Конференция была посвящена тематике космических угроз. Было уделено внимание и проблеме темного и спокойного неба. Обсуждение этой темы на большом общероссийском форуме состоялось впервые. По итогам конференции были приняты решения, одно из которых сформулировано так: *«...поддержать инициативу Международного астрономического союза о продолжении серьезного профессионального рассмотрения глобальной проблемы темного и спокойного неба на площадке ООН.»*. Активность российских астрономов приводит к повышению уровня внимания к проблеме со стороны властей. В последние два года в России состоялось несколько важных совещаний в том числе и на правительственном уровне. Работа продолжается.

## *Литература к разделу*

- 8.1. Walker C., Di Pippo S., Aubé M., Barrentine J., et al. Dark and Quiet Skies I (2020), Report of the conference held 5–9 October, 2020.
- 8.2. Walker C., Di Pippo S., Aubé M., Barrentine J., et al. Dark and Quiet Skies II (2021), Report of the conference held 3–7 October, 2021.
- 8.3. Masana E., Carrasco J.M., Bar S., Ribas S. A multi-band map of the natural night sky brightness including Gaia and Hipparcos integrated starlight // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 501, Issue 4, P. 5443–5456, 2021
- 8.4. Leinert Ch., Bowyer S., Haikala L. K., et al. The 1997 reference of diffuse night sky brightness // Astron. and Astrophys. 127, 1, 1998.
- 8.5. Williams, O. Hainaut, A. Otarola, G. H. Tan, A. Biggs, N. Phillips, and G. Rotola, A Report to ESO Council on the Impact of Satellite Constellations, arXiv:2108.03999 [8.astro-ph.IM], 2021.
- 8.6. Krantz H., Pearce E. C., Block A. Characterizing the All-Sky Brightness of Satellite Mega-Constellations and the Impact on Astronomy Research, arXiv:2110.10578 [8.astro-ph.IM]), 2021.
- 8.7. Bassa G., Hainaut O. R., Galadí-Enríquez D. Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations // Astron. and Astrophys. 657, id. A75, 2022.
- 8.8. Reiland N., Rosengren A. J., Malhotra R., Bombardelli C. Assessing and minimizing collisions in satellite mega-constellations // Adv. Space Research 67, 3755, 2021.
- 8.9. Tyson J. A., Ivezić Z., Bradshaw A., et al., Mitigation of LEO Satellite Brightness and Trail Effects on the Rubin Observatory LSST // Astron. J. 160, id. 226, 2020.
- 8.10. Rawls M.L., Thiemann H.B., Chemin V., et al. Satellite Constellation Internet Affordability and Need // Res. Notes Amer. Astron. Soc. 4, 189, 2020.
- 8.11. Hainaut V., Williams V. Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains // Astron. and Astro-phys. 636, id. A121, 2020.
- 8.12. Bektesević D., Vinković D., Rasmussen A., Ivezić Z. Linear feature detection algorithm for astronomical surveys - II. Defocusing effects on meteor tracks // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 474, 4837, 2018.
- 8.13. Iye M., Tanaka M., Yanagisawa M., et al., SuprimeCam Observation of Sporadic Meteors during Perseids 2004 // Publ. Astron. Soc. Japan 59, 841, 2007.
- 8.14. Шустов Б.М. Спутниковые мега-созвездия и проблема тёмного и спокойного неба // Астрон. ж., том 99, No 8, с. 694–704, 2022.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В книге используются следующие сокращения.

АКО	астроидно-кометная опасность
АСЗ	астероиды, сближающиеся с Землёй
АСПОС	автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях (в космосе)
ВМО	Всемирная метеорологическая организация
ГБ	гигантский болид
ГКК	глобальная климатическая катастрофа
ГПА	Главный пояс астероидов
ГСО	геостационарная орбита
ИК	инфракрасный
ДНК	дезоксирибонуклеиновая кислота
ДМ	десантный модуль (КА «ЭкзоМарс»)
ИКАО	Международная организация гражданской авиации
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	космический аппарат
КМ	космический мусор
МАС	Международный астрономический союз
МККМ	Межагентский координационный комитет по космическому мусору
МКС	Международная космическая станция
МНК	метод наименьших квадратов
МНТ	малые небесные тела (Солнечной системы)
МСЭ	Международный союз электросвязи
ОКП	околоземное космическое пространство
ОМП	отношение массы к площади
ОНТ	опасное небесное тело
ОСЗ	объекты, сближающиеся с Землёй
ПЗС	прибор с зарядовой связью
ПОО	потенциально опасные объекты
РЛС	радиолокационная станция
РН	ракетоноситель
СКА	спускаемый космический аппарат
СККП	система контроля космического пространства
СМИ	средства массовой информации
СОДА	система обнаружения дневных астероидов

TNT	тринитротолуол (взрывчатое вещество)
TCH	темное и спокойное небо
УФ	ультрафиолетовый
ЮНЕП	Программа ООН по окружающей среде
ALAN	Artificial Light at Night (искусственное ночное освещение)
COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (Комитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях)
COSPAR	Committee on Space Research (Комитет по космическим исследованиям)
D&QS	Dark and Quiet Sky (Problem) (проблема TCH)
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство)
FWHM	Full Width at Half Maximum (полная ширина на половине высоты)
GEO	Geostationary Earth Orbit (геостационарная орбита)
IAU	International Astronomical Union (то же что МАС)
IAWN	International Asteroid Warning Network (Международная сеть предупреждения об опасных астероидах)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Межправительственная группа экспертов по изменению климата)
ISON	International Scientific Optical Network (Международная сеть оптических наблюдений)
LED	Light-Emitting Diode (светодиод)
LEO	Low Earth Orbit (низкая околоземная орбита)
LSST	Large Synoptic Survey Telescope (Большой обзорный телескоп)
MBA	Main Belt of Asteroids (Главный пояс астероидов)
MMR	Mean Motion Resonance (резонанс по среднему движению)
MOID	Minimum Orbit Intersection Distance (минимальное межорбитальное расстояние)
MPC	Minor Planet Center (IAU) (Центр малых планет МАС)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства)
NEA	Near Earth Asteroids (околоземный астероид)
NEC	Near Earth Comet (околоземная комета)

NEO	Near Earth Object (околоземный объект; объект, сближающийся с Землёй)
NEOPOP	Near Earth Object Population Observation Program (Программный комплекс по наблюдению объектов, сближающихся с Землёй)
NORAD	North American Aerospace Defense Command (Командование воздушно-космической обороны Северной Америки)
PHA	Potentially Hazardous Asteroid (потенциально опасный астероид)
PHO	Potentially Hazardous Object (потенциально опасный объект)
SGP	Simplified General Perturbations (Упрощенные модели возмущений, используемых для расчета векторов орбитального состояния спутников и космического мусора)
SR	Secular Resonance (вековой резонанс)
SSA	Space Situation Awareness (осведомленность о ситуации в космосе)
TLE	Two-line Element (двухстрочный набор элементов)
VPH	Vaporized Hydrogen Peroxide (стерилизации парами перекиси водорода $H_2O_2$ )
YORP	(эффект) Ярковского-О'Кифа-Радзиевского-Паддэка

*Научное издание*

**Шустов, Борис Михайлович  
Прохоров, Михаил Евгеньевич**

# **ОПАСНОСТИ И УГРОЗЫ ИЗ КОСМОСА**

*Издается в авторской редакции*

Издательство «Знание-М»

---

Подписано в печать 18.09.2024. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 16,04. Заказ № 2233. Тираж 200 экз.  
Отпечатано с готового оригинал-макета в издательстве «Логос»

Издано в научных и учебных целях.