

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Левкина Полина Анатольевна

ФИЗИЧЕСКИЕ И ОРБИТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА  
ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

01.03.01 — астрометрия и небесная механика

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. Л.В. Рыхлова

Москва – 2016

## Оглавление

<b>Введение</b>		<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Оптические наблюдения объектов космического мусора</b>	<b>32</b>
1.1	Системы контроля космического пространства. Классификация околоземных орбит. Современные средства наблюдения объектов космического мусора . . . . .	32
1.1.1	Радиолокационные средства наблюдения космического мусора . . . . .	36
1.1.2	Оптические средства наблюдения космического мусора	37
1.2	Инструменты Звенигородской и Терскольской обсерваторий ИНАСАН для наблюдений космического мусора . . . . .	40
1.2.1	Телескоп Сантел-500 Звенигородской обсерватории ИНАСАН . . . . .	41
1.2.2	Телескоп Zeiss-2000 обсерватории на пике Терскол . . . . .	42
1.3	Программное обеспечение наблюдений космического мусора и обработки полученных данных . . . . .	46
1.4	Методика проведения оптических наблюдений и обработки измерений объектов космического мусора. Оценка точности полученных оптических наблюдений . . . . .	50
<b>2</b>	<b>Определение параметров движения и физических характеристик объектов космического мусора в области ГСО</b>	<b>55</b>
2.1	Результаты обработки и анализа оптических наблюдений космического мусора. Модель движения фрагментов космического мусора . . . . .	55

2.2	Статистика полученных наблюдений фрагментов космического мусора . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Обнаружение и изучение ранее не наблюдавшихся мало-размерных фрагментов космического мусора</b>	<b>69</b>
3.1	Обнаружение ранее не наблюдавшихся объектов. Возможности обнаружения на Zeiss-2000 . . . . .	69
3.2	Обнаружение и исследование неизвестного объекта 95334 в геостационарной области . . . . .	72
3.3	Результаты исследования нового объекта 95633 на ВЭО . . .	80
3.4	Результаты исследования новых объектов в областях скопления последствий разрушений . . . . .	82
<b>4</b>	<b>Модель изменения величины отношения площади миделева сечения к массе для объекта космического мусора</b>	<b>90</b>
4.1	Общие сведения. Постановка задачи исследования объекта с большим отношением площади миделева сечения к массе на ГСО . . . . .	90
4.2	Объект исследования и наблюдательный материал . . . . .	91
4.3	Эволюция эксцентриситета орбиты объекта . . . . .	95
4.4	Модель вариаций отношения площади миделева сечения к массе объекта . . . . .	100
4.5	Вращательное движение и оценка точности модели . . . . .	103
	<b>Заключение</b>	<b>111</b>
	<b>Список сокращений и условных обозначений</b>	<b>113</b>
	<b>Литература</b>	<b>115</b>

## Введение

Современный путь освоения космического пространства, к сожалению, приводит к экологическим угрозам атмосфере и околоземному космическому пространству.

Каждый космический запуск доставляет на орбиту Земли, помимо полезной нагрузки, целый набор отходов космического производства. Это и отделяемые ступени ракет-носителей, и разгонные блоки, и различные мелкие операционные элементы, отделяющиеся от ракетного комплекса в процессе запуска и полёта. Количество этих отходов неуклонно растёт наравне с темпами освоения и эксплуатации космоса.

Термин "космический мусор" неразрывно связан с мечтой о космических полётах и включает в себе все успехи и все неудачи человечества в космосе.

Засорение околоземного космического пространства (ОКП) началось уже после запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) в 1957 г., когда на орбите оказались ступень ракеты-носителя и другие побочные объекты выведения аппарата. С течением времени все запущенные на земную орбиту аппараты заканчивают свой срок функционирования и становятся крупными объектами космического мусора.

Научно-техническим подкомитетом комитета Организации Объединённых Наций (ООН) по использованию космического пространства в мирных целях было утверждено следующее понятие космического мусора: *"Космический мусор – все находящиеся на околоземной орбите или возвращающиеся в атмосферу антропогенные объекты, включая их фрагменты и элементы, которые являются нефункциональными"* [23].

## Классификация техногенных космических объектов

Все космические объекты, находящиеся в ОКП в настоящее время, могут быть классифицированы следующим образом:

- Функционирующие космические аппараты (КА) различного назначения и степени сложности;
- Космические аппараты, прекратившие своё активное существование (завершившие свою работу или вышедшие из строя);
- Ступени ракет-носителей (РН) и разгонные блоки (РБ), обеспечивающие выведение КА на заданную орбиту;
- Фрагменты разрушений объектов на околоземных орбитах;
- Малоразмерные операционные элементы и частицы, отделяющиеся от ракетного комплекса в космическом пространстве в процессе полёта.

По размерам (величине условного диаметра) все эти объекты можно разделить на следующие категории:

- Мелкие - менее 5 мм,
- Средние - от 5 мм до 10 см,
- Крупные - более 10 см.

Крупные и средние космические объекты могут наблюдаться наземными средствами контроля космического пространства - с помощью оптических методов и радиолокации. При этом объекты размером менее 10 см могут наблюдаться существующими средствами контроля только на низких орбитах (до 2000 км).

## Общие сведения об опасности засорения космического пространства

Опасность представляют неуправляемо сходящие с орбиты и падающие на Землю космические объекты и конструкции большой массы, а также космические аппараты с ядерными источниками энергии на борту. Разрушение подобных объектов в атмосфере или выпадение их на Землю создаёт, помимо угрозы человеческой жизни и физического ущерба, возможность наступления экологической катастрофы.

Кроме того, объекты космического мусора в ОКП создают реальную опасность высокоскоростных столкновений функционирующих аппаратов с пассивными фрагментами. Причиной досрочного разрушения объекта может стать соударение с частицей размером меньше 0.1 см со скоростью 10 км/с. При таких разрушениях одновременно могут образовываться несколько сотен только крупных фрагментов и гигантское множество мелких объектов, образуется облако орбитальных обломков. Вначале облако имеет высокую плотность содержания фрагментов и представляет собой постепенно расширяющийся эллипсоид, обращающийся по той же орбите, по которой двигался аппарат до взрыва. Затем фрагменты постепенно деформируются до "шинообразной" фигуры с осью вращения, совпадающей с осью вращения Земли. Эта "шина" постепенно охватывает практически всю Землю. Внутри "шины" фрагменты движутся по самым разнообразным орбитам, получив в результате взрыва дополнительные ускорения в любых направлениях.

Первый взрыв на орбите произошёл неполных четыре года спустя с момента запуска первого искусственного спутника Земли - 29 июля 1961 года, когда взорвалась ступень американской ракеты-носителя (РН) Ablestar. Уже тогда в околоземном космическом пространстве находилось порядка 50 объектов [51]. После взрыва образовалось около трёхсот крупных фраг-

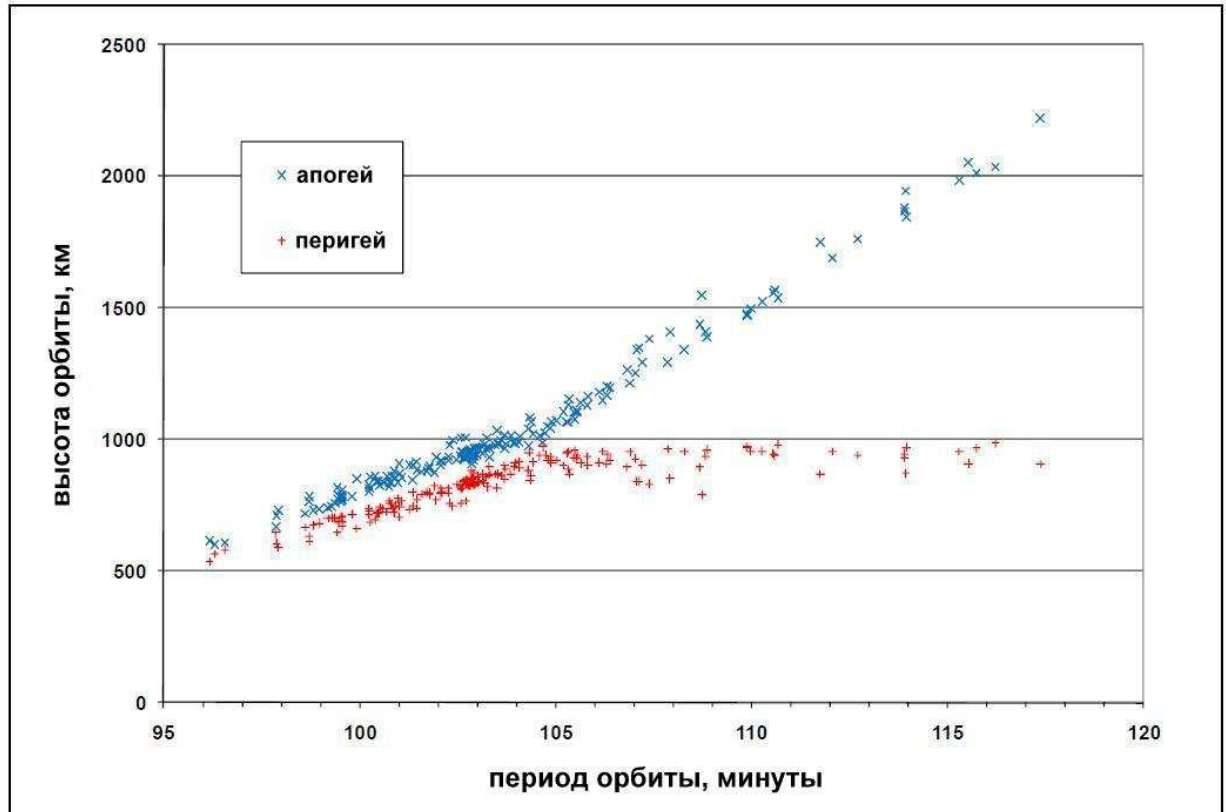


Рис. 0.1. Распределение фрагментов РН Ablestar в 2011 году.

ментов, распределившихся по всей низкой околоземной орбите (НОО), высоты некоторых превысили 2000 км. Значительная часть фрагментов, по видимому, сгорела в атмосфере, в настоящее время больше половины фрагментов разрушения Ablestar продолжают находиться на околоземных орбитах: на Рис. 0.1 показано распределение фрагментов по высотам апогея и перигея и периодам орбит в 2011 году [51].

С 1961 года имели место более двухсот случаев подобных разрушений. Одной из причин самопроизвольных взрывов на орбите называется воспламенение остатков топлива в баках. Перегрев и взрыв компонентов топлива послужили причинами взрывов верхних ступеней ракет "Дельта", "Титан", "Космос", "Протон", "Рокот", "Пегас", "Зенит" [19].

Испытания баллистического оружия КНР (разрушение КА "Fengyun-1C", 2007 г.) и США (ИСЗ "USA-193", 2008 г.) привели к образованию нескольких сотен тысяч обломков сантиметрового размера и тысяч фраг-

ментов размером больше 10 см [19].

Зафиксированные события неконтролируемого схода с орбиты и падения на Землю опасных аппаратов (как то: "Космос-954" с ядерными источниками энергии, орбитальные комплексы "Skylab" и "Салют-7"), столкновения космических объектов на орбите и многократные опасные сближения МКС с объектами космического мусора подтверждают опасность ситуации, создаваемой на орбитах Земли.

### **Современные данные о засорённости космического пространства**

В настоящее время в ОКП существует около 20000 только зарегистрированных и регулярно наблюдаемых космических объектов (КО) размером больше 10 см [19]. При этом только около 7% объектов являются функционирующими космическими аппаратами (КА), остальные относятся к пассивным объектам космического мусора.

Сейчас оптическими телескопами ЕКА и России наблюдаются фрагменты от разрушений более 12-и объектов на ГСО. Проблема контроля геостационарной орбиты постоянно усложняется. В обсерватории ESA на о.Тенерифе на ГСО обнаруживаются тысячи объектов размером менее 20 см, но для поддержания каталога этих объектов требуются регулярные наблюдения.

За 60 лет космической деятельности было осуществлено около 5000 запусков, с помощью которых на околоземные орбиты было выведено почти 6000 спутников. Накопленная масса искусственных объектов в ОКП приближается к 7000 тонн. Количество объектов в области низких околоземных орбит составляет  $\sim 77\%$  от общего числа каталогизированных объектов в ОКП. При этом в области ГСО сосредоточено  $\sim 6\%$  каталогизированных объектов, в области высокоэллиптических орбит каталогизировано  $\sim 6\%$  объектов, и 7% объектов находятся на других орбитах, в том числе в области навигационных спутниковых систем. По своему составу ката-



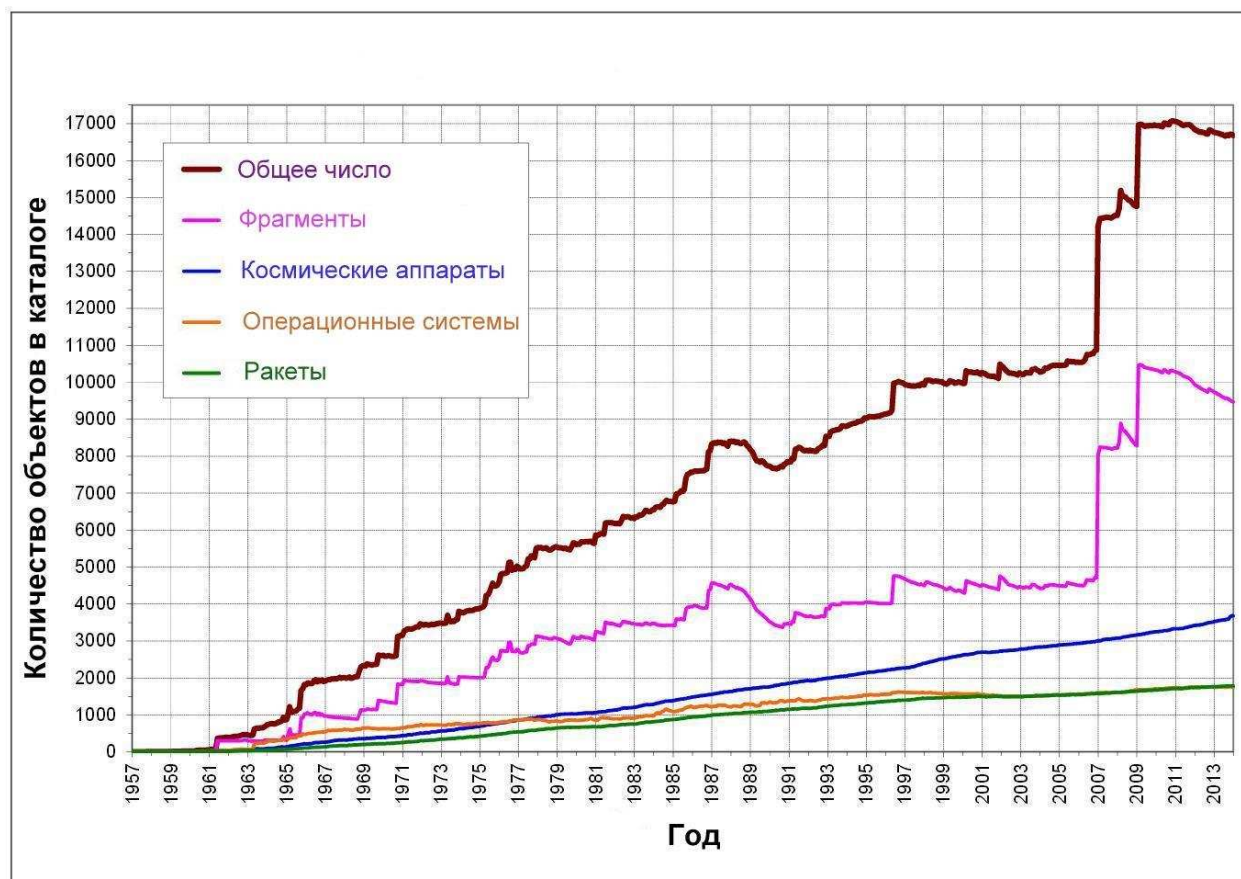


Рис. 0.2. Количество и состав популяции каталогизированных космических объектов в ОКП.

логизированные объекты включают 20% космических аппаратов, из которых функционируют только 6%; 11% составляют ступени ракет-носителей и разгонные блоки (РБ); 5% - операционные элементы, образовавшиеся в процессе запусков КА на рабочие орбиты. Основная часть каталогизированных объектов КМ (64%) является последствиями разрушений КА, РН, РБ [16].

Увеличение популяции наблюдаемых объектов космического мусора с момента первого запуска и до 2013 года показано на Рис. 0.2 (данные космического командования США, см. [52]). Значительные скачки в росте количества объектов в 2007 и в 2009 гг. обусловлены разрушением китайского аппарата "Fengyun-1C" и последствиями столкновения аппаратов "Iridium 33" и "Космос 2251" соответственно. Сокращения числа популяции (в 1989 г., в 2000 г.), видимые на графике, относятся к области низких орбит и

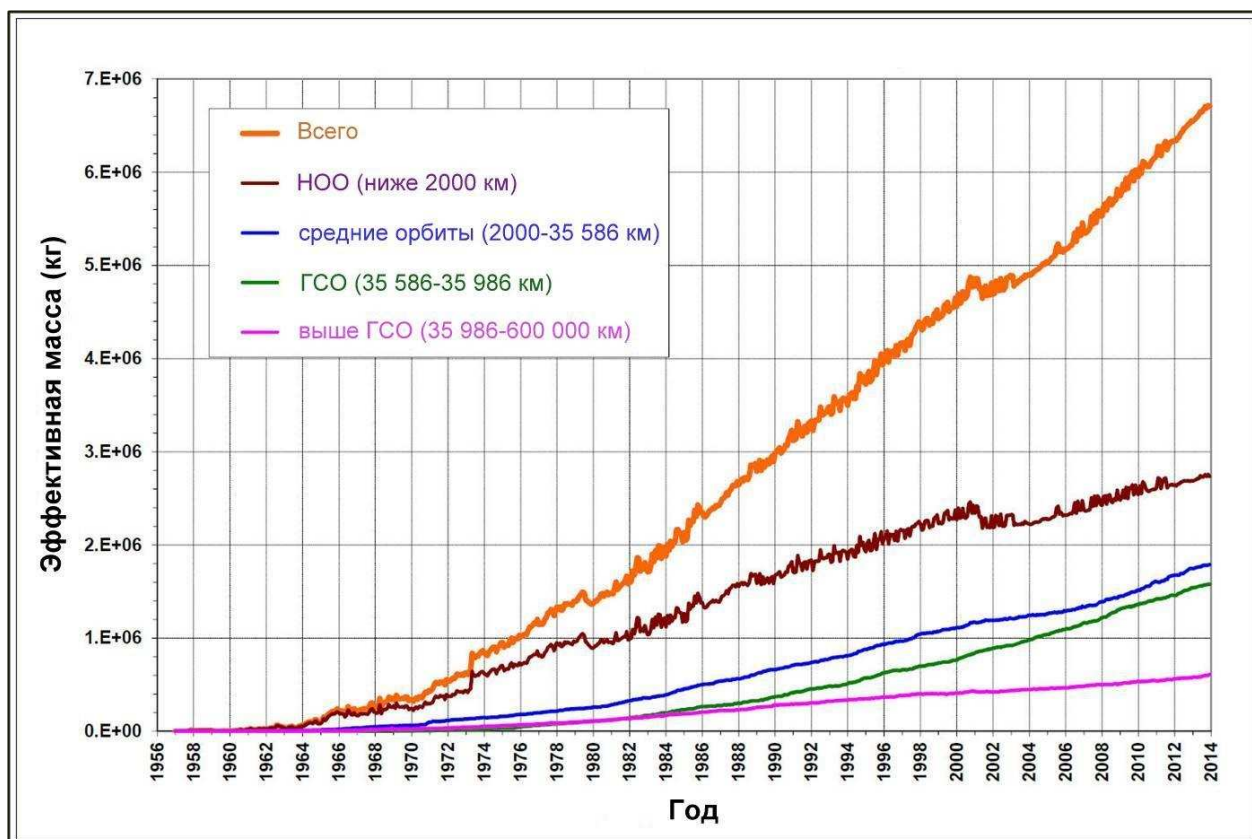


Рис. 0.3. Распределение массы космических объектов на околоземных орбитах.

связаны с 11-летним циклом активности Солнца.

На Рис. 0.3 показано распределение эффективной массы космических объектов в разных областях ОКП до 2014 года [53]. Видно, что наибольшее количество техногенной массы сосредоточено на низких околоземных орбитах. Это связано с активной эксплуатацией низких высот с самого начала космической эры и по сей день, а кроме того столкновениями и разрушениями аппаратов на этих высотах. Космические объекты на высотах 800-1000 км подвержены максимальному риску столкновения. В работе [29] приводятся результаты исследования оценки вероятности столкновения работающих КА с другими объектами на низких орбитах, из которых следует, что космический аппарат размером 10 м может иметь до 10 столкновений в год с объектами КМ более 1 мм в диаметре.

По существующим оценкам специалистов [19] в ОКП находится свыше 500 тысяч техногенных космических объектов размером 1-10 см и

несколько десятков миллионов мелких объектов (миллиметрового размера). Данные космического командования США, показанные на Рис. 0.2-0.3, регулярно публикуются в ежеквартальном отчёте NASA - Orbital Debris Quarterly News.

## **Пути решения проблемы засоренности околоземного пространства**

За последние годы проблема космического мусора значительно усложнилась по причине:

- быстрого роста количества малоразмерного мусора, требующего каталогизации (особенно на геостационарной орбите);
- обнаружения большого количества объектов с не характерной для ИСЗ большой "парусностью";
- накопления и распространения радиоактивных материалов в околоземном пространстве и пограничном слое атмосферы.

Новые проблемы привели к пониманию необходимости разработки специальных космических средств для исследования популяции космического мусора.

Основную опасность для функционирующих КА по причине их огромного количества и увеличения вероятности столкновения составляют объекты размером от 5 мм до 1 см. Главным источником роста популяции объектов КМ являются объекты размером больше 1 метра, которые с течением времени могут разрушаться по различным причинам.

В настоящее время орбиты высотой 800-1000 км отличаются особо плотной популяцией космического мусора. Естественное очищение этих высот происходит за счёт сопротивления атмосферы, этому способствует также солнечная активность.

Космические аппараты, выведенные на геостационарную орбиту, остаются там практически вечно, становясь по истечении срока активной работы пассивным небесным объектом, живущим по законам небесной механики. Тем не менее, идёт постоянный запуск новых объектов, связанный с необходимостью замены окончивших свой срок активной жизни аппаратов. Перевод устаревших геостационаров на более высокую или на более низкую орбиту в окрестности ГСО (что рекомендовано Межагентским координационным комитетом по космическому мусору (МККМ)) приводит к увеличению скорости их дрейфа в пределах от  $+34^\circ$  до  $-23^\circ$ /сутки. Соответственно, область движения ГС расширяется примерно на 2000 км по обе стороны ГСО. Прекращение коррекции геостационара становится начальным этапом эволюции его орбиты. Эволюционируя по законам небесной механики, орбиты удаленных с ГСО космических аппаратов со временем начнут пересекаться с областью нахождения ныне функционирующих КА на ГСО.

Во избежание опасности столкновения с космическим мусором функционирующих или вновь выводимых аппаратов, разработана технология увода аппаратов с геостационарной орбиты по истечении срока их активной эксплуатации с использованием для этого остатков рабочего топлива бортовой двигательной установки. Для перспективных космических аппаратов предусматриваются специальные запасы дополнительного топлива с целью обеспечения гарантированного увода отработавших спутников на орбиту "захоронения", расположенную выше геостационарной орбиты. Конкретная величина средней высоты увода объекта и минимального необходимого запаса рабочего топлива для двигателя коррекции выбирается из условия нижней минимальной границы зоны "захоронения" (в ходе последующих эволюций уведённый объект не должен опускаться ниже этой границы) и с учётом реальных характеристик объекта, определяющих величину солнечных возмущений.

Обсуждается также вопрос об исключении возможных взрывов на орбитах отработавших космических аппаратов и ракетных ступеней за счёт перехода на более совершенную технологию их разработки и эксплуатации (внедрение пассивации (выброса энергии) отработавших космических объектов - в частности ступеней РН, повышение безопасности работы бортовых химических батарей и др.). Однако, даже при полном переходе на новую технологию, нельзя говорить о прекращении взрывов на орбитах, т.к. практика показывает, что накопленные на орбитах старые объекты могут взрываться и после длительного пребывания в космосе в результате аварий, столкновений. Выше упоминалось столкновение российского отработавшего спутника и американского спутника системы Iridium в феврале 2009 года над Сибирью на высоте около 790 км. Американской сетью станций наблюдения за космическим пространством отслеживалось 280 обломков от обоих объектов.

На космических аппаратах также ставятся датчики счета соударений с метеороидами и частицами космического мусора. Существовал эксперимент с возвращением на Землю специализированного спутника LDEF (Long Duration Exposure Facility), в результате чего были получены статистические данные по засорённости низких орбит. Запущенный в 1984 году на круговую орбиту на высоту около 510 км, спутник LDEF собирал данные о распределении атомарного кислорода в атмосфере, а также о молекулярном уровне загрязнения вокруг корабля. За неполные шесть лет на орбите были получены результаты, которые используются для моделей прогнозирования воздействия атомарного кислорода на поверхности КА (<http://setas-www.larc.nasa.gov/LDEF/>).

Фундаментальная научная задача состоит в создании моделей распределения объектов космического мусора на околоземных орбитах.

При разных математических и методических подходах модели позволяют определить концентрацию частиц мусора на заданной высоте

и в заданный момент времени. Кроме того, необходимо моделирование пространственно-временного распределения объектов космического мусора с учётом различных сценариев космической деятельности и происходящих в околоземном пространстве событий (столкновений, взрывов, разрушений и др.), моделирование эволюции образующихся при этом облаков фрагментов, моделирование оценки опасности специфических космических систем ("созвездий" малоразмерных спутников, тросовых систем, парусов и др.), влияние внешних факторов космической среды на популяцию техногенных объектов и их эволюцию (солнечной активности, вариаций геомагнитного поля, гравитационного поля) и т.д. По малоразмерным спутникам предлагается тщательно выбирать параметры орбит для снижения риска столкновений и использовать дополнительные бортовые средства для повышения их "заметности". В Российской Федерации проводятся следующие работы по ограничению техногенного засорения космоса: модернизируются ракеты-носители "Союз" и "Протон-М", совершенствуются системы разделения ракетных ступеней с космическими аппаратами, на разгонном блоке предусмотрено дренирование остатков компонентов топлива после отделения аппарата. Это обеспечивает безопасный увод блока от объекта и исключает его разрушение в процессе пассивного полета.

В настоящее время к положительным тенденциям в данной сфере можно отнести понимание международным сообществом и космическими державами серьёзности проблемы космического мусора. Активно работают Межагентский координационный комитет по космическому мусору (МККМ) и Научно-технический подкомитет Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (STCS UN COPUOS). Международными организациями и космическими державами приняты меры по уменьшению роста засорённости. Роскосмосом был подготовлен новый ГОСТ по ограничению мусора, который начал действовать с 2009 г.

## Общие сведения о каталогизации космических объектов

Под каталогом космических объектов понимается база данных, содержащая в себе:

- набор элементов орбит каждого объекта, достаточный для прогнозирования его движения с необходимой точностью (координатная информация);
- международный номер-идентификатор, данные о времени и месте запуска, типе объекта, назначении, массе, размерах и т.п. (некоординатная информация).

В монографии [16] приведены принципы, согласно которым в РФ ведутся каталоги объектов околоземного космического пространства, а именно:

- Каталог ведётся в Центре контроля космического пространства, куда оперативно поступает вся необходимая информация.
- Измерения содержат координаты объектов без их привязки к международному номеру.
- Привязка измерений известных объектов к их международному номеру решается путём идентификации, т.е. прогнозированием движения на момент измерений.
- Осуществляется постоянное обновление данных каталога, т.е. оперативное и регулярное уточнение орбитальных параметров по вновь поступившим измерениям.
- Новые объекты оперативно обнаруживаются из измерений, не прошедших идентификацию.

- Данные ООН о запусках используются для привязки новых объектов к международному номеру.
- Для пополнения каталога некоординатной информацией привлекается вся возможная дополнительная информация.
- Для решения основных задач ведения каталога используются наиболее совершенные модели движения ИСЗ и космического мусора.

Источниками информации для каталогов являются радиолокационные и оптические измерения. Принципы ведения каталога космических объектов средствами российской СККП опубликованы в ряде работ (см. [28] – [41]). Данные каталога Системы контроля космического пространства США в формате двустрочных элементов *"Two Line Elements"* (TLE) по большому числу космических объектов доступны в Интернете: (<http://www.space-track.org>, <http://celestrak.com>).

## **Возмущения элементов орбит космического мусора.**

### **Модели движения космического мусора**

Для оценки состояния околоземного космического пространства и пребывающих на орбите космических объектов необходимы данные точного прогнозирования изменения их орбитальных параметров. Кеплеровские элементы орбиты объектов в классической теории невозмущённого движения ИСЗ определяются как постоянные интегрирования уравнений движения. Начальными условиями движения выступают координаты объекта в определённый момент времени. Данные каталога СККП США в формате TLE, доступные в Интернете, могут быть использованы в качестве начальных условий. Элементы орбиты в формате TLE являются усреднёнными величинами, в которых отфильтрованы коротко- и долгопериодические возмущения, вызываемые отклонением гравитационного поля Земли от центрального.



Возмущения орбитальных элементов можно разделить на три группы:

- вековые возмущения, пропорциональные времени;
- долгопериодические возмущения с периодом порядка нескольких месяцев;
- короткопериодические возмущения, имеющие период, равный времени одного оборота космического объекта вокруг Земли.

Вековые возмущения присутствуют только в долготе восходящего узла, в аргументе перигея и в средней аномалии. У большой полуоси, эксцентриситета и наклона вековые гравитационные возмущения отсутствуют.

Короткопериодические возмущения имеют порядок 10 км, не увеличиваются со временем и не учитываются при моделировании мелкого космического мусора, в отличие от долгопериодических.

На движение КО на низких орбитах оказывают влияние атмосферные возмущения за 1 виток. Под их влиянием уменьшается высота орбиты, что приводит к сгоранию объектов в атмосфере Земли или к их падению на Землю. Под действием атмосферы происходит самоочищение низких орбит околоземного пространства от космического мусора.

Модели движения космических объектов можно отнести к трём разновидностям:

- *Аналитические модели*, учитывающие формулы для вековых, долгопериодических и периодических возмущений элементов орбит. В результате определяются текущие значения оскулирующих элементов орбиты. Главное достоинство аналитических моделей - малые затраты машинного времени для выполнения прогноза. Такие модели разрабатывались на начальном этапе освоения космоса с соответствующими характеристиками вычислительных машин. Недостаток

аналитической модели - невозможность достижения высокой точности прогнозирования положения объекта. Примером аналитической модели является модель SGP4, разработанная в 1960-х гг. и приспособленная для использования элементов TLE в качестве начальных условий. Она включает малое количество параметров гравитационного поля Земли и упрощённую (статическую) модель атмосферы. Чисто аналитические модели движения могут быть наиболее эффективными для орбит, лежащих за пределами земной атмосферы, когда не требуется учёт постоянно меняющихся характеристик, позволяющих рассчитать её плотность.

- *Численно-аналитические модели.* Для интегрирования уравнений движения применяется метод усреднения, в котором для учёта вековых и долгопериодических возмущений элементов орбит составляются дифференциальные уравнения. Эти уравнения интегрируются с шагом по времени порядка суток. К результатам интегрирования добавляются короткопериодические возмущения, которые рассчитываются аналитически. Таким образом, гравитационные возмущения (подверженные быстрым изменениям) рассчитываются аналитическими методами, медленно меняющиеся (в том числе негравитационные) возмущения учитываются путём численного интегрирования соответствующих осреднённых уравнений. Такие модели требуют большего расчётного времени, но обладают и более высокой точностью. Они позволяют достаточно просто учитывать влияние как гравитационных, так и негравитационных возмущений, включая сопротивление атмосферы, световое давление и др.
- *Численные модели* основаны на численном интегрировании исходных дифференциальных уравнений движения космических объектов с малым шагом по времени (порядка минуты). Примером численной мо-

дели движения ИСЗ и космического мусора можно назвать численную модель, разработанную в Национальном исследовательском Томском государственном университете (см. [9]). Преимуществом численных методов прогнозирования движения является то, что они могут применяться для любого класса орбит и учитывать возмущения любой природы. Недостатком численных моделей является накопление ошибки округления с увеличением интервала прогнозирования, а также большое количество времени, необходимое для расчётов.

### **Современное состояние научного исследования фрагментов космического мусора на высоких орбитах**

Область высоких околоземных орбит, к которой относится геостационарная зона и высокоэллиптические орбиты, является предметом научного интереса с точки зрения влияния различных негравитационных возмущений, а также более чем полувековым периодом эксплуатации этой области ОКП. Аппараты и их фрагменты, накапливающиеся за время освоения области, на высоких орбитах могут существовать практически вечно, изучение эволюции таких пассивных объектов с различными физическими свойствами представляет интерес с точки зрения задач возмущённого движения тел.

В работах [26] — [27] выполнен анализ вековых возмущений под влиянием светового давления. Тогда было показано, что вековые возмущения, вызванные эффектом Пойнтинга-Робертсона, более чем на порядок превосходят возмущения от остальных факторов.

В работе [45] показано, что с началом XX века прецессия плоскости ГСО с периодом 53.5 года обогатит область геостационарного кольца первыми геостационарами и их фрагментами, которые вновь станут возвращаться к плоскости экватора. Развитая в ИТА РАН теория движения геостационарных объектов [14] описывает эволюцию пассивных спутников

в области ГСО и малоразмерных фрагментов космического мусора, подверженных, в частности, влиянию светового давления. Возросшее количество наблюдательных данных обнаруживаемых малоразмерных объектов после разрушения советского спутника "Экран-2" привело к ряду исследований эволюции фрагментов разрушений. В частности, авторами работы [55] был промоделирован взрыв на ГСО и исследована динамическая эволюция облака фрагментов на временных отрезках 6, 24, 54 и 72 года. В работе [36] 2005 года авторами использован параметр MEGNO для оценки вероятности повторного входа объектов с орбит захоронения в область ГСО.

Работы [54] – [60] посвящены активному развитию оптических наблюдений области ГСО в начале XX века, повлекшему за собой открытие объектов с большой парусностью [47]. Факт существования в ОКП особого класса НАMR-объектов (high area-to-mass ratio) породил целую волну работ, посвящённых исследованию орбитальной эволюции космического мусора. Европейское космическое агентство (ЕКА) анонсирует программу по изучению популяции космического мусора на высоких орбитах, в том числе и на ВЭО [58]. Метровые телескопы на Тенерифе и в Циммервальде (см. Гл.1, Табл. 1.1) активно используются для регулярных наблюдений НАMR-объектов с целью уточнения их орбит. Для исследования этого класса объектов предлагается использовать цветную фотометрию, методы спектроскопии и радарные наблюдения. Делается вывод о схожести характеристик орбитальной эволюции НАMR-объектов в разных областях околоземных орбит [48, 55] и о зависимости характера движения объектов КМ от начальных условий и от отношения площади миделева сечения к массе ( $A/m$ ).

В работах [64, 65] показано применение аналитических и полуаналитических методов для уравнений движения НАMR-объектов. При оценке движения объектов с большим  $A/m$  под действием солнечного давления с помощью критерия MEGNO также показано высокое значение характери-

стик начальных условий [63].

Получение регулярных данных о движении объектов с большим  $A/m$  позволяет выявить особенности эволюции орбитальных параметров, обусловленных исключительно действием светового давления. Количественная оценка отношения площади миделева сечения к массе (далее - *"отношения площади к массе"* (ОПМ)) объекта называется ключевым параметром для моделирования движения ИНТ в различных областях ОКП в работах [17, 37], в том числе и для высокоэллиптических объектов типа "Молнии" [56]. Наблюдения объектов космического мусора сложной формы дают ряд мгновенных оценок некоординатных характеристик (блеска, парусности), которые требуют отдельного исследования и моделирования на длительных интервалах времени. Подобный подход продемонстрирован в [4].

Длинный ряд однородных высокоточных наблюдений высокоорбитальных объектов, подверженных влиянию светового давления, являющийся первостепенной задачей для исследования долговременной эволюции параметров их орбит, составляет основу представленной работы.

### **Актуальность проведённых исследований**

Актуальность исследований, проведённых в настоящей работе, обусловлена:

- постоянным ростом популяции малоразмерного космического мусора в областях движения действующих космических аппаратов, и, как следствие, увеличением вероятности столкновений - необходимостью поддержки и пополнения существующего каталога космических объектов;
- большим количеством объектов, которые трудно обнаруживать и сопровождать в силу их неизвестной формы и параметров вращения.

Необходимостью получения высокоточных оптических наблюдений на больших временных интервалах для изучения особенностей движения таких объектов;

- неполнотой имеющихся каталогов космических объектов;
- необходимостью точного учёта влияния различных возмущений на сравнительно недавно открытый класс объектов космического мусора с большим значением отношения площади к массе ( $A/m$ ).

### Цели диссертации

При работе над диссертацией были поставлены следующие цели:

- Получить высокоточные оптические наблюдения малоразмерных объектов космического мусора в геостационарной области (ГСО) на интервале нескольких лет для поддержания каталога космических объектов;
- Определить и исследовать физические характеристики и параметры орбит избранных объектов на ГСО и на высокоэллиптических орбитах, в том числе объектов с большим отношением площади к массе;
- Пополнить каталог космических объектов за счёт новых малоразмерных объектов космического мусора, недоступных малоапертурным телескопам, определить их характеристики и возможные причины их образования;
- Исследовать поступательно-вращательное движение объектов космического мусора в области ГСО и определить закономерности изменения величины отношения  $A/m$  по данным длинного однородного ряда наблюдений.

## **Научная новизна**

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Получен уникальный наблюдательный материал на интервале времени нескольких лет для малоразмерных объектов космического мусора на ГСО и в области высокоэллиптических орбит.
2. Определён массив орбитальных параметров и физических характеристик объектов космического мусора, в том числе для ранее не наблюдавшихся объектов.
3. Обнаружены малоразмерные объекты космического мусора, недоступные небольшим телескопам, определены их характеристики и возможные причины образования нескольких объектов.
4. Для некоторых обнаруженных объектов космического мусора показано, что они принадлежат к областям скопления последствий разрушений ИСЗ.
5. Изучено поступательно-вращательное движение объекта космического мусора в геостационарной области, впервые предложена модель вариаций величины отношения площади к массе, определён характер изменения величины эксцентриситета.

Ряд результатов (пп.1,3,4,5) получен впервые.

## **Практическая и научная значимость**

Основные результаты настоящей работы, определяющие её практическую и научную значимость, опубликованы в авторитетных научных изданиях. Наиболее существенные результаты диссертации могут быть использованы в рамках развития теории движения объектов космического мусо-

ра при учёте влияния негравитационных эффектов на высокоорбитальные фрагменты. Практическая значимость диссертации заключается в:

- поддержании каталога известных малоразмерных космических объектов (получении новых наблюдательных данных и уточнении орбит известных объектов космического мусора);
- пополнении каталога космических объектов в рамках проблемы космического мусора в ОКП (открытии новых объектов в геостационарной области с последующим сопровождением на большой наблюдательной дуге и определением орбит);
- повышении точности прогноза движения малоразмерных объектов космического мусора неизвестной формы;
- применении полученных результатов для уточнения модели движения космического мусора.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В течение шести лет на телескопах Звенигородской и Терскольской обсерваторий ИНАСАН проведены наблюдения объектов космического мусора в геостационарной области и на высокоэллиптических орбитах. Полученные измерения координат соответствуют точности, необходимой для изучения долгосрочной орбитальной эволюции объектов. Обработка результатов наблюдений позволила получить массив физических и орбитальных характеристик малоразмерных объектов космического мусора сложной формы на высоких орбитах. Данные массива объектов космического мусора используется для последующего сопровождения и уточнения орбитальных параметров.
2. Во время наблюдений на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН были обнаружены новые, ранее не каталогизированные объ-



екты. Результаты анализа впервые наблюдавшихся малоразмерных объектов космического мусора показали, что среди новых фрагментов есть неизвестные ранее обломки разрушений разгонного блока Транстейдж и спутника связи "Экран-2".

3. Исследовано поступательно-вращательное движение объекта космического мусора с большим отношением площади миделева сечения к массе, измерения координат и оценок блеска которого были получены в течение шести лет наблюдений на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории. Установлен наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта, обусловленный влиянием светового давления. Показано, что для долгосрочного прогноза орбиты необходимы регулярные наблюдения для уточнения величины эксцентриситета.
4. Сделан вывод о вариативности величины отношения площади миделева сечения для объекта сложной формы на высокой орбите. Построена модель изменения величины ОПМ, на основе которой были выявлены особенности вращательного движения объекта. С учётом новых данных уточнена используемая численно-аналитическая модель движения ИСЗ и космического мусора. Показано, что учёт изменения величины отношения площади миделева сечения к массе позволяет более точно прогнозировать параметры орбиты объекта.

### **Апробация результатов**

Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались:

- на конкурсах молодых учёных ИНАСАН (2011, 2012, 2013, 2015),
- семинарах ИНАСАН (2014, 2015),

- на Всероссийской астрометрической конференции "Пулково" (ГАО РАН; 2012, 2015),
- студенческой конференции "Физика космоса" (Коуровская обсерватория УрФУ; 2012, 2013, 2015),
- Всероссийской конференции "Физика - космосу" (Байконур; 2014),
- V конференции молодых учёных и специалистов ЦНИИмаш (Королёв; 2015),
- на "Иосифьяновских чтениях" (Истра; 2009, 2015),

а также

- на международной конференции "Околоземная астрономия" (2011, 2013, 2015),
- на международной конференции Sixth European Conference on Space Debris (Дармштадт, 2013).

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Результаты наблюдений космических объектов в астрономической обсерватории на пике Терскол / *Левкина П.А.*, // Известия вузов "Геодезия и аэрофотосъемка". — 2010. — Вып. 3. — № 6. — С. 45–47.
2. Наблюдение неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории / *Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Сергеев А.В., Чазов В.В.*, // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнёва. — 2011. — Вып. 6(39). — С. 186–190.

3. Результаты фотометрических и позиционных наблюдений фрагментов космического мусора в обсерватории на пике Терскол / *Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Сергеев А.В., Чазов В.В.*, // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове, №220. Труды Всероссийской астрометрической конференции "ПУЛКОВО-2012". – 2013. –С. 47–52.
4. Эмпирическая модель движения фрагмента космического мусора в геостационарной области / *Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Чазов В.В.*, // *Астрономический Вестник*. – 2016. –Т. 50. –С. 141–146.
5. Результаты наблюдений неизвестных фрагментов космического мусора в геостационарной области / *Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Чазов В.В.*, // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове, №223. Труды Всероссийской астрометрической конференции "ПУЛКОВО-2015". – 2016. –С. 33–38.
6. Характеристики малоразмерных фрагментов космического мусора по наблюдениям в обсерватории на пике Терскол / *Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Рышлова Л.В., Чазов В.В., Сергеев А.В., Карпов Н.В.*, // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2016. –Т. 32. –№ 5. –С. 34–39.
7. Исследование космического мусора в обсерватории на пике Терскол / *Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Рышлова Л.В., Сергеев А.В., Тарадий В.К., Карпов Н.В., Чазов В.В.*, // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2016. –Т. 32. –№ 5. –С. 40–44.

В совместных работах участие автора в постановке задачи, проведении расчётов и анализе результатов равное с другими соавторами.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Число страниц в диссертации – 124, рисунков – 43, таблиц – 13. Список литературы состоит из 66 наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели, поставленные перед автором работы, предмет и методы проведённых исследований, обсуждается новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту, апробация результатов, список опубликованных по теме диссертации работ. Кроме того, дан обзор последних научных работ по тематике исследования. Приведён краткий обзор содержания диссертации.

В **Главе 1 "Оптические наблюдения объектов космического мусора"** дано описание процесса оптических наблюдений объектов космического мусора, которые были использованы в настоящей работе.

В *параграфе 1.1. "Системы контроля космического пространства. Классификация околоземных орбит. Современные средства наблюдения объектов космического мусора"* приведены задачи и функции системы контроля космического пространства. Дана классификация околоземных орбит по их параметрам и назначению. Приведено краткое описание современных наземных средств наблюдения объектов космического мусора - оптическими методами и методами радиолокации. Даны характеристики современных оптических телескопов, осуществляющих наблюдения космического мусора в геостационарной области.

В *параграфе 1.2. "Инструменты Звенигородской и Терскольской обсерваторий ИНАСАН для наблюдений космического мусора"* даются ха-

рактеристики оптических телескопов наблюдательных баз ИНАСАН, с помощью которых в 2009-2015 гг. были получены измерения объектов КМ, использованные в настоящей работе.

В параграфе 1.3. *"Программное обеспечение наблюдений космического мусора и обработки полученных данных"* приведено описание программ получения ПЗС-кадров и обработки снимков.

В параграфе 1.4. *"Методика проведения оптических наблюдений и обработки измерений космического мусора. Оценка точности проводимых наблюдений"* описаны этапы процесса оптических наблюдений объектов космического мусора на Терскольской и Звенигородской обсерваториях ИНАСАН, особенности позиционных и фотометрических измерений. Подробно описан процесс обработки ПЗС-кадров, приведён пример выходного sre-файла. Оценена точность проводимых координатных измерений.

В Главе 2 *"Определение параметров движения и физических характеристик объектов космического мусора в области ГСО"* приведены данные о содержании наблюдательного каталога объектов космического мусора.

В параграфе 2.1. *"Модель движения фрагментов космического мусора. Результаты анализа оптических наблюдений космического мусора"* описана используемая модель движения объектов космического мусора. В параграфе приведено описание получения оценки величины отношения площади миделева сечения к массе объекта КМ.

В параграфе 2.2. *"Статистика полученных наблюдений фрагментов космического мусора"* приведены данные о наблюдавшихся объектах. Показана область высоких орбит, охватываемая наблюдениями в обсерватории на пике Терскол.

В Главе 3 *"Обнаружение и каталогизация малоразмерных фрагментов космического мусора"* приведены результаты исследований объектов в различных областях околоземного пространства, наблюдав-

шихся с целью пополнения динамического каталога объектов космического мусора.

В параграфе 3.1. *"Обнаружение ранее не наблюдававшихся объектов. Возможности обнаружения малоразмерных объектов на ГСО с помощью аппаратуры телескопа Zeiss-2000"* описана проблема обнаружения некаталогизированных объектов космического мусора в области ГСО. Показана возможность наблюдения малоразмерных объектов, обладающих слабым блеском, на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН.

В параграфе 3.2. *"Обнаружение и исследование неизвестного объекта (95334) в геостационарной области"* исследовано орбитальное движение впервые наблюдавшегося объекта на ГСО.

В параграфе 3.3. *"Результаты исследования нового объекта (95633) на высокоэллиптической орбите"* приведены результаты анализа движения объекта на высокоэллиптической орбите, открытого на Звенигородской обсерватории. В параграфе дано описание результатов исследования изменения блеска, сделан долгосрочный прогноз движения объекта вплоть до времени входа его в плотные слои атмосферы Земли.

В параграфе 3.4. *"Результаты исследования новооткрытых объектов в областях скопления последствий разрушений"* исследованы неизвестные объекты, обнаруженные в 2015 году. Показано, что некоторые из новых объектов с большой вероятностью являются последствиями разрушений на ГСО разгонного блока Transtage и спутника "Экран-2".

В Главе 4 *"Влияние светового давления на орбитальное движение и эволюцию орбит фрагментов космического мусора"* исследовано поступательно-вращательное движение малоразмерного фрагмента КМ в геостационарной области.

В параграфе 4.1. *"Общие сведения. Постановка задачи исследования объекта с большим отношением площади миделева сечения к массе на ГСО"* обсуждено существование в околоземном пространстве особого клас-

са объектов - с большим отношением площади миделева сечения к массе - и влияние светового давления на такие объекты.

В параграфе 4.2. "*Объект исследования и наблюдательный материал*" описан выбор объекта исследований, история его открытия, данные о родительском теле. Кратко приводится наблюдательный материал, используемый для исследования, и оценка точности полученных измерений.

В параграфе 4.3. "*Эволюция эксцентриситета орбиты объекта*" приводится описание и объяснение обнаруженного из наблюдений факта возрастания эксцентриситета орбиты. Оценены амплитуда и период вариаций эксцентриситета.

В параграфе 4.4. "*Модель вариаций отношения площади миделева сечения к массе объекта*" исследовано изменение величины отношения  $A/m$  в разных наблюдательных сеансах. Предложена модель вариаций величины отношения  $A/m$ , приведены основные параметры модели.

В параграфе 4.5. "*Вращательное движение и оценка точности модели*" даны результаты оценки точности предложенной модели вариаций величины  $A/m$ , представлен контрольный массив наблюдений. Сделаны выводы о вращательном движении исследуемого объекта.

В **Заключении** суммированы основные результаты работы. Отмечены направления дальнейшей работы по теме диссертации.

# 1. Оптические наблюдения объектов космического мусора

## 1.1. Системы контроля космического пространства. Классификация околоземных орбит. Современные средства наблюдения объектов космического мусора

Все искусственные космические объекты, находящиеся на околоземных орбитах, нуждаются в постоянном мониторинге их движения, каталогизации и уточнении орбитальных параметров для последующего прогнозирования их положения. В первую очередь контролю на орбите подлежат крупные космические объекты (КО). Информация об их местоположении требует регулярного уточнения с помощью новых наблюдательных данных. Для осуществления этих целей необходима сеть наблюдательных средств - система контроля космического пространства. В настоящее время в мире существуют две системы контроля космического пространства (СККП), созданные с целью национальной безопасности - принадлежащие Министерствам обороны Российской Федерации и США. Главной задачей СККП является ведение общего каталога искусственных космических объектов, в том числе представляющих опасность для действующих космических аппаратов (КА). Среди функций СККП можно обратить внимание на следующие:

- обнаружение новых КО, определение их первоначальных орбит;
- ведение главного каталога СККП;
- регулярное уточнение орбит каталогизированных КО;
- прогнозирование движения КО;



- расчёт и выдача целеуказаний (эфemerид) наблюдательным пунктам;
- определение некоординатных характеристик КО;
- оценка космической обстановки.

К реализации этой задачи привлекаются наземные наблюдательные средства в виде сети пунктов, разнесённых по всему миру.

Объекты космического мусора существуют во всём околоземном пространстве: от высот МКС до ГСО. Околоземные орбиты классифицируются следующим образом:

- низкие околоземные орбиты (НОО, *англ.* LEO - Low Earth Orbit);
- солнечно-синхронные орбиты (ССО, *англ.* SSO - Sun-Synchronous Orbits);
- средневысотные орбиты (СВО, *англ.* MEO - Medium Earth Orbits);
- высокоэллиптические орбиты (ВЭО, *англ.* HEO - Highly Elliptical Orbits);
- геостационарная орбита (ГСО, *англ.* GEO - Geostationary Orbit);
- геосинхронные орбиты (*англ.* GSO - Geosynchronous Orbits);
- орбиты захоронения (ОЗ, *англ.* DO - Disposal Orbits).

*Низкие околоземные орбиты (НОО)* включают в себя диапазон высот от 100 км (иногда немного ниже) до 2000 км. У разных экспертов верхний предел колеблется от 1500 до 3000 км, редко до 5000 км. НОО используются для телекоммуникационных спутников, так как здесь им требуются менее мощные усилители; для спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и разведывательных аппаратов, поскольку на этих орбитах

они находятся ближе к поверхности. Международная Космическая Станция (МКС) находится на НОО с высотой около 400 км над поверхностью Земли.

*Солнечно-синхронная орбита (ССО)* - низкая орбита, плоскость которой прецессирует со скоростью обращения Земли вокруг Солнца. КА на такой орбите ежедневно наблюдает одну и ту же освещённость Земли (проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время). Таким образом, угол освещения земной поверхности приблизительно одинаков на всех проходах спутника. Такие постоянные условия освещения хорошо подходят для спутников, получающих изображения земной поверхности (в том числе спутников ДЗЗ, метеоспутников).

Нет единого мнения относительно границ класса *орбит средних высот (СВО)*. В разных источниках эти орбиты могут охватывать диапазоны высот от 5000 до 10000 км, от 1500 или 2000 до 20000 км или до ГСО, иногда это некоторая область около высоты 20000 км [40]. Средневысотные спутниковые системы обеспечивают более качественные характеристики обслуживания, чем геостационарные, поскольку в поле зрения одновременно находится большое число КА. За счёт этого появляется возможность увеличить минимальные углы видимости КА. Средневысотные спутники выигрывают у высоких (см. далее - ГСО) по энергетическим показателям, но проигрывают им по продолжительности пребывания КА в зоне радиовидимости наземных станций (1.5-2 ч).

*Геосинхронные орбиты* - близкие к круговым орбиты с периодом обращения, равным звёздному периоду вращения Земли, и с любым наклоном. Если орбита имеет отличное от нуля наклонение и нулевой эксцентриситет, то при наблюдении с Земли спутник в течение суток описывает на небе восьмёрку. Если наклонение и эксцентриситет отличны от нуля, то восьмёрка может, в зависимости от конкретных величин наклонения и экс-

центриситета, вырождаться в эллипс или в отрезок прямой, лежащий в плоскости экватора (при ненулевом эксцентриситете и нулевом наклонении). Точка симметрии фигуры находится в экваториальной плоскости. Геосинхронные орбиты используются для размещения спутников связи. Иногда вывод на геосинхронную орбиту вызван тем, что у ракеты-носителя, которой был запущен спутник, недостаточно энергии для того, чтобы вывести этот космический аппарат прямо на ГСО.

*Геостационарная орбита (ГСО)* - орбита с периодом около 24 ч, наклонением и эксцентриситетом, близкими к нулю. Находясь на такой орбите, ИСЗ занимает относительно постоянное положение над экватором на высоте  $\sim 35785$  км. Небольшие отклонения эксцентриситета и наклона от нуля приводят к регулярным перемещениям ИСЗ около фиксированной точки. Геостационарная орбита является разновидностью геосинхронной орбиты и используется для размещения коммуникационных, телетрансляционных и т.п. спутников.

*Высокоэллиптические орбиты (ВЭО)* имеют эксцентриситет более 0.5...0.6 (в разных классификациях). Этот класс орбит включает такие подклассы, как орбиты типа КА "Молния" и геопереходные орбиты (ГПО, *англ.* GTO - Geostationary transfer orbits). Орбиты типа КА "Молния" - высокоэллиптические орбиты с наклонением  $63...65^\circ$ , периодом около 12 ч и апогеем в северном полушарии. Эти орбиты используются для обеспечения связи и функций раннего предупреждения о ракетном нападении. В отличие от НОО и ГСО, которые в первом приближении являются круговыми, геопереходная орбита - это сильно вытянутая эллиптическая траектория движения КА, перигей которой лежит на расстоянии НОО от Земли, а апогей - на расстоянии ГСО.

Иногда рассматривают как самостоятельный класс *орбиты захоронения (ОЗ)*. КА по завершении активного существования превращаются в КМ и представляют угрозу для действующих и вновь запускаемых аппара-

тов, и должны быть переведены на орбиту захоронения. Особенно это критично для КА, функционирующих на активно используемой ГСО. Рассматриваются и используются орбиты захоронения и для ИСЗ, действующих на верхних высотах класса низких орбит (НОО). Для ИСЗ с полусинхронными орбитами, например, космической системы GPS (Global Positioning System), орбиты захоронения расположены на 220...810 км выше или на 95...250 км ниже первоначальных, рабочих орбит [50]. В последние годы КА GPS стали переводиться в конце функционирования на орбиты захоронения с нижней границей 500 км выше номинальной [40]. На геостационарной орбите КА, начиная с 1977 г., регулярно переводятся на орбиты захоронения, расположенные на 50...1000 км выше ГСО. Однако некоторые КА были переведены на орбиты ниже ГСО. Комитет IADC считает наиболее целесообразным перевод отработавших геостационарных КА на 300 км выше ГСО. В 2004 г. в США Федеральная комиссия по связям выставляла требования к операторам ИСЗ переводить геостационарные ИСЗ по завершении их функционирования на орбиты 200...300 км выше ГСО. В 2005 г. эти правила приняты к исполнению (см. [21, 23]).

К наземным средствам наблюдения объектов космического мусора относятся оптические и радиолокационные средства.

### **1.1.1. Радиолокационные средства наблюдения космического мусора**

Радиолокационные средства наблюдения используются для обнаружения и сопровождения фрагментов КМ в низкоорбитальной области. Статистические измерения с помощью радиолокации используются для построения моделей распределения космического мусора в этой области. Предельный размер сопровождаемых радиолокационными средствами объектов составляет около 5-10 см [20].

После обнаружения целей наблюдений радиолокационная станция

(РЛС) осуществляет их сопровождение, автоматически удаляет помехи и детектирует ложные объекты.

Достоинством радиолокации является независимость наблюдений от времени суток, освещённости цели, погодных условий. Кроме того, радионаблюдения обладают высокой производительностью и способностью обнаружения, обусловленной характеристиками комплекса. Существует возможность одновременно контролировать до нескольких сотен целей. Программное обслуживание радиолокационных измерений отличается простотой, в отличие от оптических средств.

К недостаткам радиолокации можно отнести зависимость чувствительности от четвёртой степени расстояния до цели, высокую стоимость создания оборудования и его обслуживания, большое потребление электроэнергии. Кроме того, существует возможность неоднозначности измерений, в частности, при определении размеров космического объекта.

В настоящее время активно развивается группировка РЛС дальнего обнаружения системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН). Географическое расположение РЛС дальнего обнаружения, размеры и ориентация зон действия, энергетический потенциал станций позволяют обнаруживать космические объекты размерами от десятков сантиметров в широком диапазоне дальностей. Есть возможность работы в режиме функционирования по целеуказаниям от СККП и передачи в центр обработки информации усреднённые по группе или единичные измерения координатной и некоординатной информации [2].

### **1.1.2. Оптические средства наблюдения космического мусора**

Средства наблюдения объектов космического мусора в оптическом диапазоне используются для обнаружения и наблюдения фрагментов на высоких и переходных орбитах. Предельный размер сопровождаемых объектов составляет 10-50 см.

Для осуществления оптических наблюдений космического мусора достаточно освещения объекта Солнцем. Чувствительность оптических средств обратно пропорциональна квадрату расстояния до цели, они не требуют больших мощностей электропитания.

К недостаткам оптических наблюдательных средств необходимо отнести их зависимость от времени суток, погоды, фаз Луны, фазы освещённости цели. Кроме того, оптике доступно малое количество целей одновременно. Для осуществления оптических наблюдений космического мусора и их обработки требуется более сложное программное обеспечение.

Поскольку настоящая работа основана на проведённых автором наблюдениях объектов космического мусора в оптическом диапазоне, следует подробнее остановиться на сложностях такого рода наблюдений.

Исследуемые объекты - фрагменты космического мусора - обладают изначально неизвестной формой, особенностями изменения блеска, несвойственными функционирующим аппаратам. Из-за отсутствия какой-либо первоначальной информации об объекте возникает сложность наблюдения и сопровождения неизвестных объектов. Объект космического мусора сложной формы подвержен влиянию совокупности возмущающих сил, что также усложняет регулярные наблюдения таких объектов, т.е. поддержание уже имеющегося каталога космического мусора.

Существование класса объектов с большим отношением площади к массе (ОПМ) (см. [47, 62]) обуславливает необходимость учёта влияния негравитационных возмущений на орбитальное движение КМ в процессе обработки наблюдений. Разности величин ОПМ для разных объектов этого класса характеризуют различную физическую природу объектов космического мусора. Для таких объектов целесообразно создание собственных, регулярно пополняющихся новыми наблюдениями, моделей движения.

Объекты космического мусора на высокоэллиптических орбитах (ВЭО) подвержены быстрому изменению величины блеска. Их тяжело на-

Таблица 1.1. Современные оптические телескопы, работающие в области ГСО.

Инструмент	Апертура	Проницающая на ГСО, экспозиция	Доступные объекты на ГСО, точность	Назначение
Space Debris Telescope (Тенерифе)	1 м	$19^m \dots 21^m$ при 30 с	15 см	кампании МККМ наблюдений КМ
ZIMLAT (Циммервальд)	1 м	$20^m$	< 20 см, 0.1 - 0.3"	отладка программ SDT
ROSACE (CNES)	0.5 м	$19^m$	< 20 см, 1 - 2"	медленные объекты в ГСО
PIMS (Великобритания)	0.4 м	$\sim 15^m$	$\sim 1$ м	мониторинг ГСО
CAT (Италия)	0.4 м	$17^m$ при 20 с	50 см	обнаружение объектов на ГСО
CDT (Мексика)	0.32 м	$17.1^m$ при 30 с	50 см	контроль ГСО
MODEST (Чили)	0.6/0.9 м	$18^m$ при 5 с	30 см	обнаружение мелких объектов на ГСО
AZT33-IR (Саяны)	1.7 м	до $22^m$	$\sim 10$ см, 0.15"	обнаружение мелких объектов, фотометрия
Zeiss-2000 (Приэльбрусье)	2 м	$21^m$ при 3 с	$\sim 10$ см, 0.10 - 0.15"	обнаружение мелких объектов на ГСО

блюдовать, не имея достоверной информации об изменении величины блеска. Кроме того, при оптических наблюдениях таких объектов необходимо учитывать суточное изменение элементов орбиты, например, наклона. Быстродвижущиеся на каждом витке высокоэллиптические объекты удобнее наблюдать в точках зависания, на максимальных углах наклона к плоскости экватора.

В настоящей работе рассмотрены некоторые результаты решения проблем наблюдения космических объектов наземными оптическими средствами, а именно инструментами Звенигородской наблюдательной базы ИНАСАН и обсерватории на пике Терскол (Терскольского филиала ИНАСАН).

В таблице 1.1 приведены характеристики мировых оптических инструментов, осуществляющих наблюдения космического мусора в зоне геостационарных орбит. Среди них можно выделить основной оптический инструмент Европейского космического агентства (ЕКА) - Space Debris Telescope (SDT), работающий в совокупности с телескопом ZIMLAT в швейцарском Циммервальде в рамках наблюдательных кампаний МККМ. Точность позиционных измерений телескопа ZIMLAT для медленных объектов составляет 0.1-0.3". Для сравнения точность определения положения медленных объектов в области ГСО для астрономического комплекса ROSACE, принадлежащего французскому космическому агентству (CNES), составляет 1-2" [49].

Характеристики телескопа Zeiss-2000 в Терскольской обсерватории на Северном Кавказе, который был использован для получения наблюдений КМ в настоящей работе, подробно описаны ниже.

## **1.2. Инструменты Звенигородской и Терскольской обсерваторий ИНАСАН для наблюдений космического мусора**

На наблюдательных пунктах Института астрономии РАН ведутся регулярные оптические наблюдения объектов космического мусора в области



геостационарных орбит. В рамках диссертации были поставлены следующие задачи наблюдений: получение высокоточных измерений малоразмерных фрагментов космического мусора в геостационарной области и обработка полученных наблюдений; обнаружение, сопровождение и каталогизация ранее не наблюдавшихся объектов КМ с последующим определением физических и орбитальных характеристик фрагментов.

Оптические наблюдения объектов космического мусора, использованные в настоящей работе, были получены на аппаратуре телескопов Сантел-500 Звенигородской обсерватории и Zeiss-2000 обсерватории на пике Терскол с 2009 по 2015 гг.

### **1.2.1. Телескоп Сантел-500 Звенигородской обсерватории ИНАСАН**

Звенигородская обсерватория ИНАСАН была создана в 1959 году как экспериментальная станция для оптических наблюдений ИСЗ.

В 1971 году на обсерватории была введена в эксплуатацию самая большая в мире спутниковая камера ВАУ (Высокоточная астрономическая установка). С помощью ВАУ, способной проводить массовые наблюдения геостационарных спутников, был получен наблюдательный материал, послуживший базой для составления каталогов положений и орбит ГСС [5].

В 2009 году взамен центрального штатного телескопа-гида на трёхосной следящей монтировке камеры ВАУ был установлен новый оптико-электронный инструмент для наблюдений околоземных небесных тел, состоящий из широкоугольного телескопа Сантел-500, изготовленного А. Санковичем [25]. Сравнительные характеристики камеры ВАУ со штатным гидом и установленным вместо него телескопом Сантел-500 приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Основные характеристики штатной камеры ВАУ и телескопа Сантел-500.

	<b>ВАУ</b>	<b>Сантел-500</b>
<b>Диаметр главного зеркала</b>	100 см	50 см
<b>Апертура</b>	50 см	50 см
<b>Фокусное расстояние</b>	70 см	125 см
<b>Детектор</b>	фотоплёнка	ПЗС-камера FLI PL 9000 3056 × 3056 пикселей
<b>Поле зрения</b>	30° × 5°	1.65° × 1.65°
<b>Точность ед. измерения ГСС</b>	1.2"	0.15"
<b>Предельная зв. вел. для обнаружения ГСС</b>	15 <sup>m</sup>	17 <sup>m</sup>

В настоящее время с помощью аппаратуры телескопа Сантел-500 решаются следующие задачи: проведение регулярных наблюдений объектов космического мусора в области ГСО и на высокоэллиптических орбитах [6], проведение измерений блеска объектов КМ ярче 17-18-й звёздной величины, наблюдение утерянных объектов (не наблюдавшихся более 50 суток) с целью уточнения их орбит.

В качестве светоприёмника в настоящее время используется ПЗС-камера FLI PL 9000. Проницающая способность в геостационарной области для комплекса аппаратуры на Сантел-500 составляет  $\sim 17^m$  (см. табл. 1.2).

### 1.2.2. Телескоп Zeiss-2000 обсерватории на пике Терскол

Международная астрономическая обсерватория на пике Терскол на Северном Кавказе (ныне Терскольский филиал ИНАСАН (ТФ ИНАСАН)) была создана для сохранения и дальнейшего развития ранее накопленного потенциала астрономических исследований в Приэльбрусье.

Основной инструмент обсерватории телескоп Zeiss-2000 обладает следующими характеристиками: действующее отверстие главного зеркала -

2000 мм; эквивалентное фокусное расстояние - 16000 мм (система Ричи-Кретьена); поле, свободное от виньетирования - 330 мм ( $1.18^\circ$ ).

Известно, что главным достоинством крупного телескопа является высокая проникающая способность. Крупный телескоп создаёт следующие преимущества для наблюдений объектов в ОКП:

- снижение влияния погодного фактора и возможность проведения оптических наблюдений при лёгкой облачности, в разрывах густых облаков, при любых фазах Луны, в сумерках и т.д.;
- возможность наблюдения очень слабых ( $21^m$ ) и небольших (размером менее 20 см) объектов (сброшенные детали конструкций космических аппаратов, фрагменты аппаратов и т.п.). При благоприятных условиях для двухметрового телескопа на пике Терскол - в отсутствие Луны и облачности - доступны объекты размером около 10 см, движущиеся в окрестностях геостационарной орбиты;
- возможность одновременного наблюдения нескольких объектов, движущихся относительно звезд в любом направлении;
- большой входной световой поток, что позволяет применить узкополосные светофильтры, как для выделения интересующих наблюдателей объектов на фоне оптических помех, так и для наблюдения различных процессов на самом объекте (выбросы вещества, разделение модулей и т.п.);
- большая входная апертура (табл. 1.3) создаёт благоприятные условия для фотометрии КА с точностью до  $\sim 0.01^m$  с привязкой данных наблюдений к фотометрическим системам посредством наблюдений в качестве стандартов звезд 12-15-й звёздной величины из обзорных каталогов.

Таблица 1.3. Сравнение основных характеристик ПЗС-камер на Zeiss-2000.

	<b>ПЗС-камера "ФОТОМЕТРИКС" с фокальным редуктором</b>	<b>ПЗС-камера FLI PL 4301 (система Ричи-Кретьена)</b>
<b>Апертура</b>	2 м	2 м
<b>Фокальное расстояние</b>	~ 6.3 м	16 м
<b>Размер ПЗС</b>	561 × 512 пикселей	2084 × 2084 пикселей
<b>Размер пикселя</b>	~ 29 × 27 мкм	24 × 24 мкм
<b>Поле зрения</b>	8' × 8'	~ 12' × 12'
<b>Быстродействие</b>	10-20 с	2-5 с
<b>Порог обнаружения на ГСО (проницающая)</b>	до 20 <sup>m</sup>	до 22 <sup>m</sup>

Наблюдения искусственных небесных объектов на астрономическом комплексе Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН начались в 1997 г. Телескоп был оснащён фокальным редуктором Института аэронамики общества Макса Планка, в котором была установлена ПЗС-камера фирмы FOTOMETRICS с охлаждением жидким азотом. С помощью этого оборудования на Терскольской обсерватории осуществлялись наблюдения, сопутствующие запускам ИСЗ, и оптический мониторинг большинства активных геостационарных спутников Земли [12].

В 2006 году в Терскольском филиале ИНАСАН начались регулярные наблюдения фрагментов космического мусора на геостационарной орбите. Оптические наблюдения фрагментов космического мусора с блеском слабее 16-й звёздной величины выполнялись на комплексе Zeiss-2000 с помощью ПЗС-камеры FOTOMETRICS (см. Табл. 1.3), проработавшей на Zeiss-2000 до 2009 года [3].

В начале 2009 года на двухметровый телескоп ТФ ИНАСАН был установлен и отъюстирован новый приёмник FLI PL 4301. Пробные наблюде-

ния показали его пригодность для решения задач околоземной астрономии и исследования объектов космического мусора.

В таблице 1.3 приведены сравнительные характеристики ПЗС-камер на Zeiss-2000.

В настоящее время ПЗС-камера FLI PL 4301 предназначена для работы с телескопом Zeiss-2000 в качестве штатного прибора для фундаментальных и прикладных астрономических исследований с применением метода относительных позиционных и фотометрических измерений небесных тел. Дополнительной задачей камеры являются фотометрические измерения с применением сменных светофильтров.

К преимуществам камеры FLI PL 4301 можно отнести:

- выигрыш в проникающей около двух звёздных величин и, как следствие, возможность наблюдения на геостационарной орбите космических объектов размером около 10 см;
- преимущество в быстродействии в 5-10 раз;
- размер поля зрения на 50% больше, что обуславливает возможность поиска новых объектов и проведения обзорных наблюдений;
- снижена зависимость от условий наблюдений, возможно наблюдение в период полнолуния, в зоне Млечного пути.

С 2009 г. и до настоящего времени все оптические наблюдения космического мусора в обсерватории на пике Терскол выполняются с помощью ПЗС-камеры FLI PL 4301, в том числе и наблюдения, результаты которых использованы в настоящей работе.

### 1.3. Программное обеспечение наблюдений космического мусора и обработки полученных данных

Процесс наблюдений объектов космического мусора на комплексе оптического телескопа, оснащённого ПЗС-приёмником, состоит из следующих этапов:

1. Определение поправок инструмента.
2. Выставление осей телескопа по эфемериде объекта (по координатам зоны поиска).
3. Получение ПЗС-изображений, сопровождение объекта.

На Рис. 1.1 показано окно программы CameraControl во время наблюдений на Терсколе. На снимке чёрным квадратом отмечен наблюдаемый объект, медленно движущийся на фоне треков звёзд. В момент, запечатлённый на Рис. 1.1, камера охлаждена до  $-24^{\circ}\text{C}$ , осуществляется 5-я экспозиция из 40.

Слева в окне программы на Рис. 1.1 расположены характеристики объекта и самой съёмки, выставляемые вручную перед началом экспозиции. Это: номер объекта, ориентация камеры относительно сторон света, эфемериды объекта - часовой угол и склонение (в данном случае это и координаты центра кадра), префикс имени ПЗС-кадра (включает в себя номер объекта и порядковый номер экспозиции). Для известных объектов космического мусора вводимый номер объекта должен быть точным номером наблюдаемого объекта в обозначениях данного каталога объектов (подробнее о каталоге объектов см. в Главе 2). Например, "90073", без каких-либо дополнительных символов (как представлено на Рис. 1.1). Введение номера обязательно, по нему осуществляется ориентация скриптов программ обработки, определяется, куда помещать результаты измерений и откуда брать эфемеридное положение объекта.

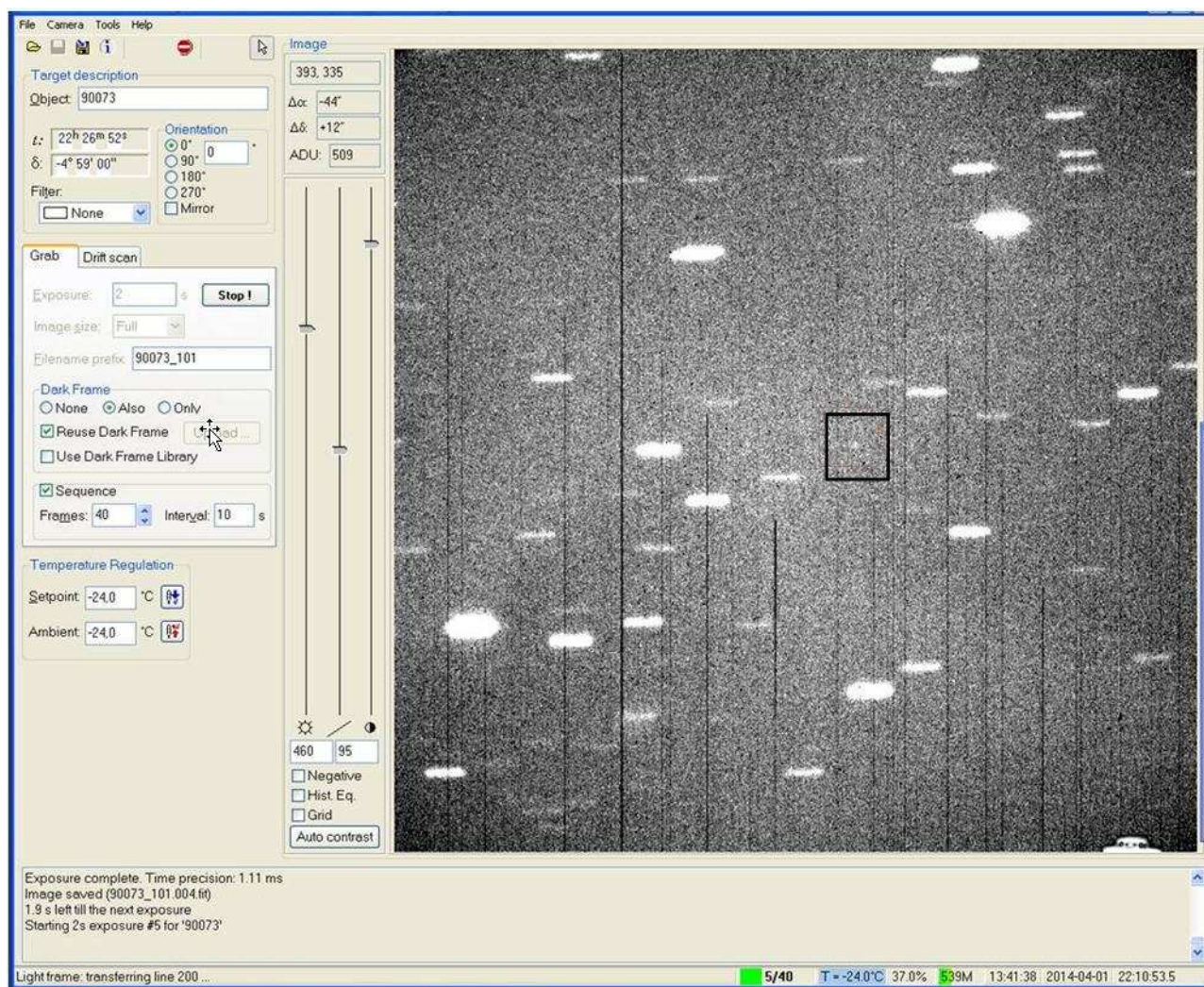


Рис. 1.1. Окно программы CameraControl во время наблюдений.

Для регистрации моментов времени используется система регистрации времени для ПЗС-приёмников, созданная в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (ГАО РАН) [24].

Основным форматом изображений, поддерживаемым пакетом обработки Арех II, является формат FITS (Flexible Image Transport System), общепринятый в наблюдательной астрономии.

На Рис. 1.1 внизу в рабочей строке справа показан текущий момент по Всемирному координированному времени, UTC (*англ.* Coordinated Universal Time). Программа CameraControl автоматически записывает в заголовок ПЗС-кадра момент начала экспозиции по UTC в стандартном формате.

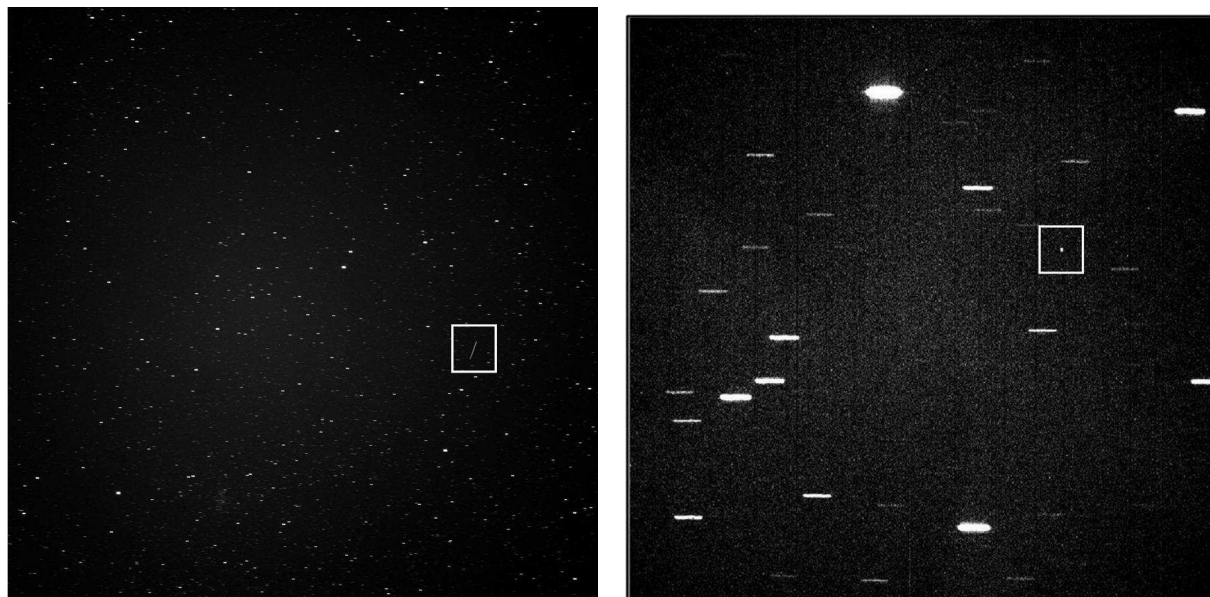


Рис. 1.2. Примеры ПЗС-изображений, получаемых во время наблюдений космического мусора. Слева - на телескопе Сантел-500 (а). Справа - на телескопе Zeiss-2000 (б).

Для FITS запись содержит - "**YYYY-MM-DDTНН:ММ:SS.SSS**", где "**YYYY**" - год; "**ММ**" - месяц; "**DD**" - день; "**T**" - разделитель (по стандарту Международной Организации по Стандартизации, ISO) даты и времени; "**НН**" - часы; "**ММ**" - минуты; "**SS.SSS**" - секунды до тысячных долей.

Кроме того, перед началом съёмки указывается продолжительность экспозиции в секундах, количество кадров в одной серии (при серийной съёмке) и интервал между кадрами. Есть возможность получить экспозицию полного кадра или его части (Image size). Также можно указать учёт фона неба сразу во время экспозиции (Dark frame).

На Рис. 1.2(а,б) показаны примеры ПЗС-кадров в формате FITS, получаемых на аппаратуре телескопов Сантел-500 и Zeiss-2000 соответственно. Квадратами отмечены объекты космического мусора в поле зрения. На Рис. 1.2(а) сопровождается относительно быстрый объект, на Рис. 1.2(б) объект обладает малой скоростью движения.

Обработка ПЗС-изображений также осуществляется с помощью программного комплекса Арех II, разработанного в ГАО РАН [11,46]. Входны-



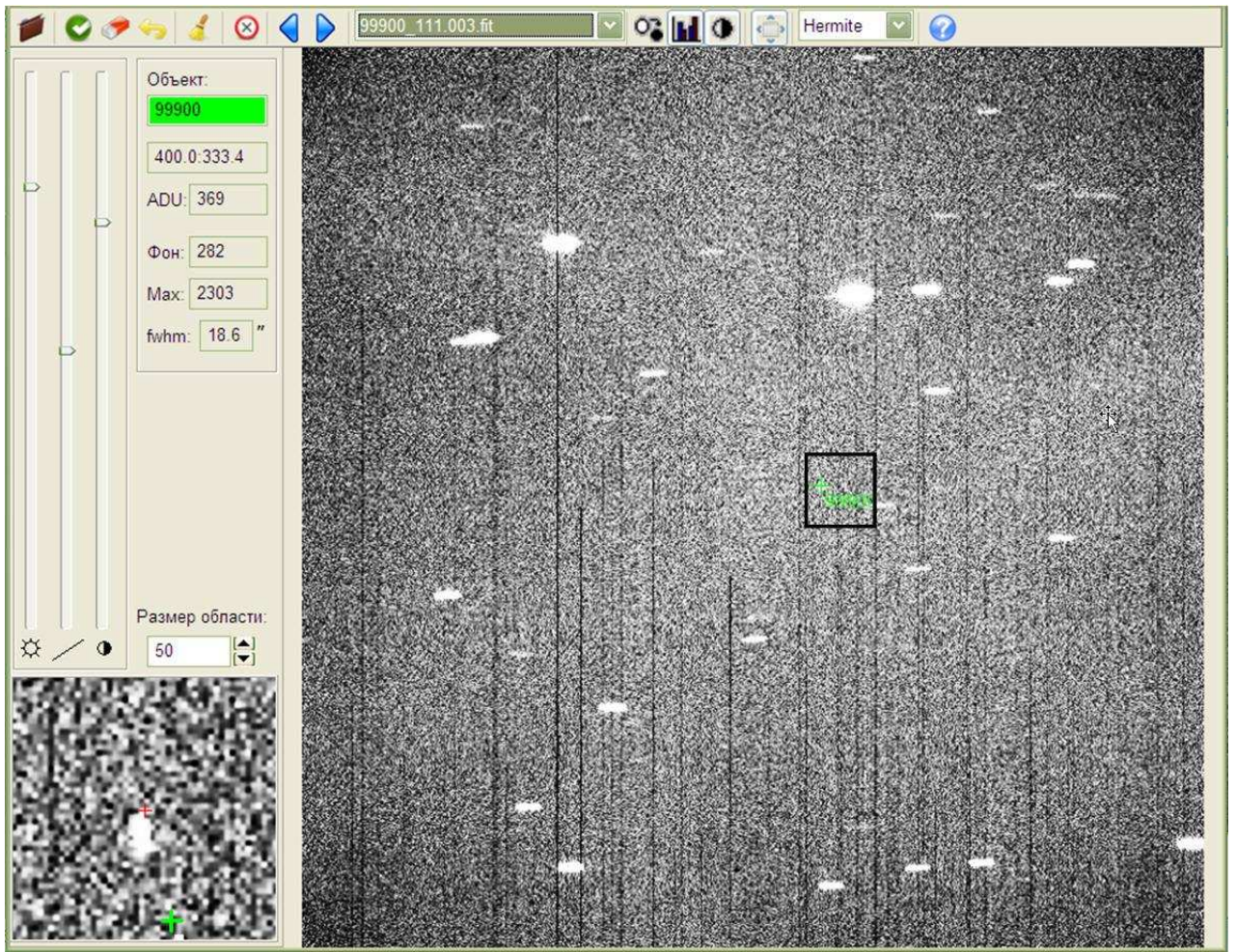


Рис. 1.3. Окно программы Object Locator во время обработки наблюдений.

ми данными являются полученные ПЗС-изображения, содержащие координаты центра поля, моменты времени экспозиций (UTC), номер объекта.

Кроме того, на каждом кадре должно быть указано положение наблюдаемого объекта. Для этого используется программа Object Locator, рабочее окно которой приведено на Рис. 1.3. Чёрным квадратом отмечено положение наблюдаемого объекта космического мусора 99900. На Рис. 1.3 слева внизу показано окно "лупы", в котором сейчас находится объект.

В программе Object Locator осуществляется разметка ПЗС-кадров: указывается положение объекта на кадре с известными координатами центра. При последующей автоматической обработке определяются координаты объекта на кадре.

#### **1.4. Методика проведения оптических наблюдений и обработки измерений объектов космического мусора. Оценка точности полученных оптических наблюдений**

Наблюдения на Терскольской обсерватории ИНАСАН происходят сеансами 2-4 раза в год по 14-20 рабочих ночей. Большинство наблюдений малоразмерных объектов в геостационарной области и на ВЭО, использованных в данной работе, получено на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН.

На Звенигородской обсерватории ИНАСАН наблюдения объектов космического мусора проводятся в каждую ясную ночь. На Сантел-500 осуществляется сопровождение объектов на ГСО ярче 18-й звездной величины, а также наблюдение объектов на высокоэллиптических орбитах с целью уточнения орбитальных характеристик.

Процесс оптических наблюдений объектов космического мусора состоит из выполнения следующих этапов работы:

1. Определение географических координат местоположения пункта наблюдений (антенны GPS-приёмника) и синхронизация системных часов (рабочего компьютера) со службой точного времени GPS (за час до начала наблюдений);
2. Дистанционное охлаждение камеры FLI (до  $-20 \dots -25^{\circ}\text{C}$ );
3. Поиск, обнаружение объектов в поле зрения и получение снимков с помощью программы CameraControl и программного обеспечения, предназначенного для дистанционного управления осями телескопа;
4. Отбраковка снимков вручную в процессе наблюдений (если необходимо - см. далее);
5. После завершения программы наблюдений камера нагревается приблизительно до температуры окружающей среды и отключается. Тех-

ническое оборудование проверяется и выключается до следующего сеанса наблюдений.

При обнаружении неизвестного объекта требуется не менее часа-полутора часов непрерывного сопровождения объекта в его орбитальном движении с тем, чтобы, определив предварительную орбиту объекта, обнаружить его на следующую ночь.

Позиционные наблюдения известных объектов (для поддержания каталога) осуществляются короткими сериями по 2-3 минуты с частотой кадров 10 сек. и с экспозицией 1-4 сек. в зависимости от состояния неба и угловой скорости объекта по кадру.

Измерения блеска осуществляются при хорошем состоянии неба долгими сериями по 30-60 минут с экспозицией 0.8-1 сек. с частотой кадров 6 сек. Для очень слабых объектов экспозиция может быть увеличена до 3-4 сек.

После получения снимков (см. Рис. 1.2) производится разметка кадров с помощью программы Object Locator (см. Рис. 1.3). Общее требование состоит в том, что каждый объект должен иметь свой уникальный номер в данную ночь. При уверенности, что кадр не пойдёт в обработку (например, на нём нет объекта или опорных звезд), он удаляется.

На снимках отмечаются положения спутников, проверяются имена файлов и снятых объектов. После подготовки кадров таким образом запускается собственно обработка, но, как уже было сказано выше, только в том случае, если приблизительные координаты центра поля были введены на стадии наблюдений. В противном случае они вносятся с помощью скрипта предобработки (препроцессинга). Для этого надо поместить в директорию с кадрами файл эфемериды (или файлы - если объектов в директории несколько). Каждый эфемеридный файл должен называться в точности так, как называется объект; т.е., например, для объекта "90073" это должен быть файл "90073", чтобы скрипт препроцессинга смог найти

нужный файл.

С помощью программной системы Арех II автоматически получают-ся данные координатных измерений объектов и оценок их блеска. На Рис. 1.4 приведён пример выходного sre-файла. В шапке файла указан код обсерватории (в системе каталога объектов) и пятизначный номер объекта.

Первая колонка данных - дата измерения: **DDMMYY**, где **DD** - день, **MM** - месяц, **YY** - год.

Вторая колонка - момент конца экспозиции по UTC: **hhmmss**, где **hh** - часы, **mm** - минуты, **ss** - секунды с точностью до 0.5 сек.

Третья колонка - прямое восхождение объекта на данный момент экспозиции в часовой мере, с точностью до 0.01 часовой секунды.

Четвёртая колонка - склонение объекта в угловой мере, с точностью до 0.01 секунды дуги.

Пятая колонка - точность оценки блеска (до  $00.1^m$ ) и значение оценки блеска объекта. На рис. 1.4 для первого момента времени оценка блеска равна  $16.1^m$ .

Таким образом, выходные файлы после обработки ПЗС-изображений содержат измеренные топоцентрические прямое восхождение и склонение объекта в стандартной небесной системе координат и оценку блеска в интегральных звёздных величинах на момент времени наблюдений.

Массив полученных sre-файлов используется для вычисления параметров орбит объектов космического мусора и определения их физических характеристик (см. Главу 2 настоящей работы).

В процессе наблюдений регулярно обнаруживаются объекты, отсутствующие в каталоге, и вычисляются параметры их движения [7].

Используя данные наблюдений на коротких интервалах времени, можно оценить внутреннюю точность наших наблюдений.

Оценка погрешности единичных наблюдений была получена следующим методом. По данным наблюдений объекта на короткой наблюдатель-

```

просмотр 90073_151020.spe - Far
D:\Observations\spe\2015\Terskol_2015oct\spe151020\90073_151020.spe
СИСТ 10012 090073
201015 22151550 05003191 -05415985 001161
201015 22153500 05005138 -05413245 001172
201015 22154100 05005735 -05412416 001157
201015 22154800 05010432 -05411412 001173
201015 22155500 05011133 -05410471 001173
201015 22160900 05012528 -05404512 001149
201015 22161600 05013231 -05403512 001171
201015 22162300 05013926 -05402527 001161
201015 22163000 05014622 -05401534 001171
201015 22163700 05015316 -05400563 001157
201015 22164400 05020015 -05395563 001160
201015 22165100 05020711 -05394610 001145
201015 22165800 05021413 -05393615 001170
201015 22170500 05022111 -05392611 001144
201015 22171200 05022809 -05391631 001161
201015 22171900 05023506 -05390658 001158
201015 22173300 05024901 -05384693 001172
201015 22174700 05030299 -05382746 001145
201015 22175400 05030999 -05381801 001161
201015 22180100 05031695 -05380764 001163
201015 22180800 05032393 -05375823 001160
211015 00141300 06584989 -03085816 001184
211015 00141900 06585591 -03085122 001181
211015 00142600 06590281 -03084375 001182
211015 00145150 06592820 -03081502 001186
211015 00150350 06594004 -03080198 001185
211015 00151050 06594703 -03075434 001185
211015 00152675 07000316 -03073646 001187
211015 00153875 07001501 -03072356 001183
211015 00155675 07003293 -03070314 001181
211015 00160275 07003888 -03065640 001192
211015 00160875 07004484 -03065011 001190
211015 00162075 07005674 -03063648 001188
211015 00163275 07010862 -03062337 001187
211015 00163875 07011456 -03061581 001181
211015 00165675 07013245 -03055680 001183
211015 00170275 07013840 -03055008 001186
211015 00170875 07014435 -03054363 001180
211015 00172075 07015627 -03053064 001186
211015 00173275 07020820 -03051761 001185
211015 00175075 07022605 -03045788 001182
211015 00180875 07024389 -03043772 001185
211015 00181475 07024989 -03043121 001189
211015 00182075 07025584 -03042494 001184
211015 00182675 07030178 -03041847 001186
211015 00183275 07030772 -03041199 001185

```

Рис. 1.4. Окно выходного spe-файла для объекта 90073.

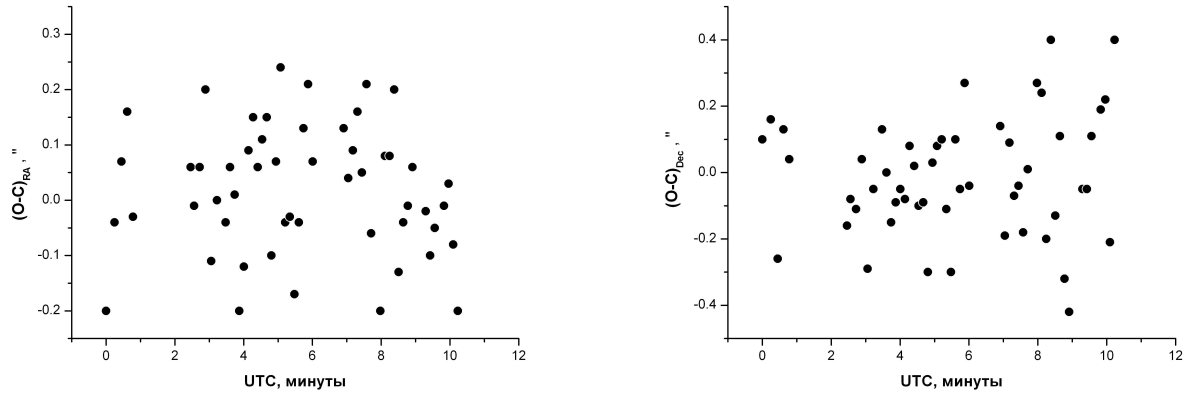


Рис. 1.5. Невязки по прямому восхождению (слева) и склонению (справа) на короткой серии наблюдений.

ной дуге (порядка 10 минут) были вычислены средние параметры движения, а затем определены отклонения от предварительно вычисленных координат для каждого измерения.

На рис. 1.5 приведены средние квадратические отклонения (O-C) по прямому восхождению и склонению для точечного объекта в поле зрения при хорошем состоянии неба.

Здесь среднее квадратическое отклонение по прямому восхождению составляет  $0.11''$ , по склонению -  $0.18''$ , это соответствует расчётным значениям инструментальных погрешностей наших наблюдений для объектов космического мусора (в среднем около  $0.15''$ ) (см. Табл. 1.1).

## 2. Определение параметров движения и физических характеристик объектов космического мусора в области ГСО

### 2.1. Результаты обработки и анализа оптических наблюдений космического мусора. Модель движения фрагментов космического мусора

Результатами обработки ПЗС-изображений для каждого объекта наблюдений является набор измеренных топоцентрических координат - прямого восхождения и склонения объекта (в стандартной небесной системе координат) и оценка блеска в интегральных звёздных величинах на момент времени наблюдений (см. п.1.4. настоящей работы). После анализа полученных данных мы имеем каталог элементов орбит наблюдавшихся объектов на эпоху наблюдения, в котором:

$a$  - большая полуось [км],

$e$  - эксцентриситет орбиты,

$i$  - угол наклона [°],

$\Omega$  - долгота восходящего узла [°],

$N$  - количество измеренных положений,

$\sigma$  - средняя квадратическая погрешность ["],

$A/m$  - оценка отношения площади миделева сечения к массе [м<sup>2</sup>/кг].

Для определения параметров движения и физических характеристик объектов космического мусора в настоящей работе использовалась численно-аналитическая модель движения искусственных спутников Земли, разработанная профессором Е.П. Аксёновым в рамках решения обобщённой задачи двух неподвижных центров [1], расширенная и дополненная

путём построения модели поступательного движения околоземных космических объектов в численно-аналитической форме [30].

В используемой модели движения при обработке орбитальных данных учитываются следующие эффекты:

- возмущения, связанные с несферичностью Земли;
- вековые изменения гармонических коэффициентов;
- возмущения от приливных деформаций центрального тела;
- возмущения от океанических приливов;
- лунно-солнечные возмущения;
- возмущения от влияния светового давления.

Алгоритм учёта влияния возмущающей функции светового давления на движение искусственных космических объектов приведён в работе Чазова В.В. [31] во втором разделе. Оценка величины  $A/m$  обусловлена определением величины коэффициента отражения  $C_r$ . Коэффициент отражения обусловлен произведением постоянной величины  $P_0$  и функции времени, которая определяется особенностями конструкции космического объекта.

Величина  $P_0 = 4.5606 \cdot 10^{-6} \text{Н/м}^2$  соответствует давлению солнечного света на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а.е.) (соображения, приводящие к выводам этой величины, описаны в монографии [22]). Значение коэффициента отражения определяется формулой:

$$C_r = 10^{-3} \cdot P_0 \cdot k_r \cdot \frac{A}{m}, \quad (2.1)$$

где

$k_r$  - эмпирический коэффициент отражения ( $k_r = 1$  - зеркальное отражение,  $k_r = 1.44$  - полное диффузное рассеивание),  $1 < k_r < 1.5$ ;

$A$  - площадь миделева сечения объекта [ $\text{м}^2$ ];



$m$  - масса объекта [кг].

Т.к.  $C_r = 4.5606 \cdot 10^{-9} \cdot k_r \cdot \frac{A}{m}$ , то, полагая  $k_r \approx 1.0$ , можно оценить отношение площади миделева сечения  $A$  к массе объекта  $m$ .

Проверка методики определения величины отношения  $A/m$  осуществлялась по данным объекта спутника Sirio с известными характеристиками. Это отработавший итальянский экспериментальный научный аппарат, находящийся в либрационном режиме с малой амплитудой около точки либрации  $+75^\circ$  в.д. Для Sirio:  $A/m = 0.009 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Измерение координат и блеска Sirio проводилось каждую наблюдательную ночь несколькими сеансами, распределёнными в течение ночи. Оценка величины отношения  $A/m$  по наблюдениям для Sirio была вычислена равной 0.010-0.014  $\text{м}^2/\text{кг}$ , что соответствует параметрам этого КА.

Основной массив наблюдений, использованный в настоящей работе, был получен на комплексе телескопа Zeiss-2000 Терскольской обсерватории, приведённая далее статистика относится к измерениям, полученным в рамках наблюдательных сеансов в обсерватории на Северном Кавказе.

## **2.2. Статистика полученных наблюдений фрагментов космического мусора**

Наблюдения фрагментов космического мусора преследуют различные цели. Это поддержание каталога объектов путём регулярных наблюдений для уточнения орбит КМ, обнаружение и сопровождение новых объектов, ранее не наблюдавшихся. Ключевой научной задачей наблюдений является исследование орбитальных и физических параметров избранных объектов с целью выявления особенностей и закономерностей движения.

План наблюдений в каждом сеансе на Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН составлялся исходя из плана научной работы по программе "Астрономия в Приэльбрусье" (см. [32], <http://www.inasan.ru/rus/terskol/research.html>) в рамках тематики ИСЗ и космического мусора. Особое внимание уделя-

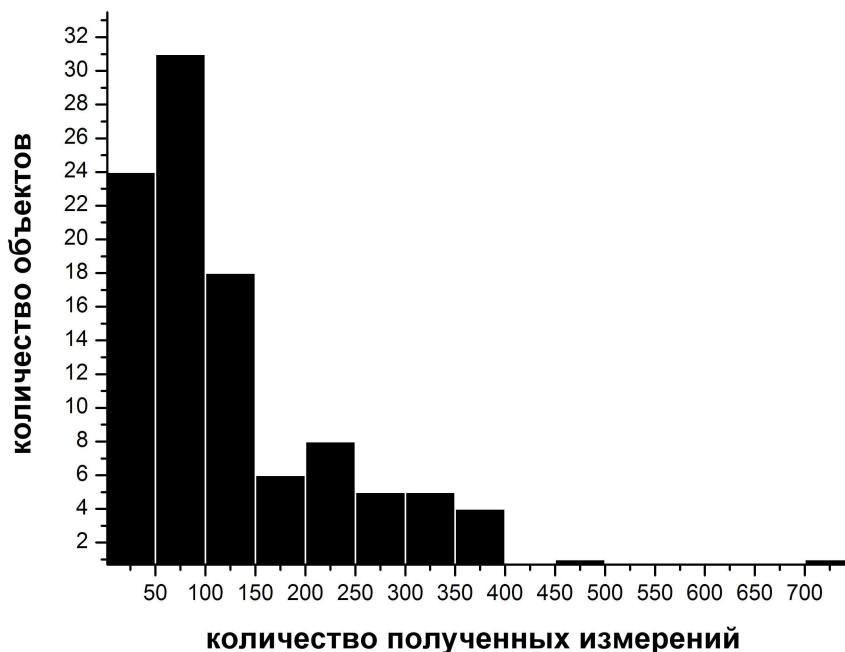


Рис. 2.1. Распределение количества наблюдавшихся объектов относительно всего массива полученных измерений (2014-2015 гг.).

лось плановым наблюдениям каталогизированных объектов, нуждающихся в новой измерительной информации, т.е. не наблюдавшихся по разным причинам более месяца.

На Рис. 2.1 представлена статистика наблюдений фрагментов космического мусора за последние два года (2014-2015) регулярных сеансов на Терсколе (четыре сеанса в год). Под полученными измерениями подразумевается количество измерений моментов времени UTC, топоцентрических координат и оценок блеска объектов во время наблюдений.

На Рис. 2.1 можно выделить три группы наблюдавшихся объектов. Первая, в которую входит больше всего фрагментов КМ и для которой получено наименьшее количество измерений (три первых столбца диаграммы) - это больше семидесяти объектов, для каждого из которых получено порядка 50...150 измерений координат и блеска. Это каталогизированные объекты, которые нуждаются в уточнении орбит, сюда входят не регулярно наблюдаемые фрагменты КМ. Координатные измерения этих объектов

получены короткими сериями в течение нескольких ночей за сеанс в целях поддержания каталога объектов космического мусора.

Вторая группа наблюдавшихся объектов на Рис. 2.1 (пять следующих столбцов диаграммы) включает в себя около тридцати объектов, для каждого из которых получено 150...400 координатных измерений. В эту группу входят утерянные и неизвестные ранее фрагменты космического мусора. Наблюдения этих объектов совершаются долгими сериями (особенно во время первого прохождения - для утерянных, в ночь обнаружения - для новых объектов) в течение нескольких ночей за сеанс: для новых фрагментов - вплоть до их ухода из видимости пункта наблюдений, для утерянных - до точного определения орбитальных параметров с тем, чтобы объект мог быть уверенно обнаружен, в том числе и другими наземными средствами. Наблюдения этой группы объектов преследуют цель поддержания и пополнения действующего каталога фрагментов космического мусора.

В третью группу наблюдавшихся объектов КМ в 2014-2015 гг. входят два объекта. Для этих объектов получено наибольшее количество измерений - порядка пятисот положений и оценок блеска для одного и около восьмисот для другого. Эти объекты наблюдались нами с научными целями: получение представительных рядов наблюдений необходимо для исследования особенностей орбитального движения и вращения фрагментов космического мусора в области геостационарной орбиты. Результатам этого исследования посвящена Глава 4 настоящей работы.

На Рис. 2.2 показано статистическое распределение фрагментов КМ, наблюдавшихся в Терскольской обсерватории в 2014-2015 гг. по величинам угла наклона.

Все фрагменты КМ, наблюдавшиеся в обсерватории на пике Терскол, в том числе ранее неизвестные, расположены в области геостационарной орбиты. ГСО является особоохраняемой областью околоземного космического пространства, распределение наклонов объектов этой области ле-

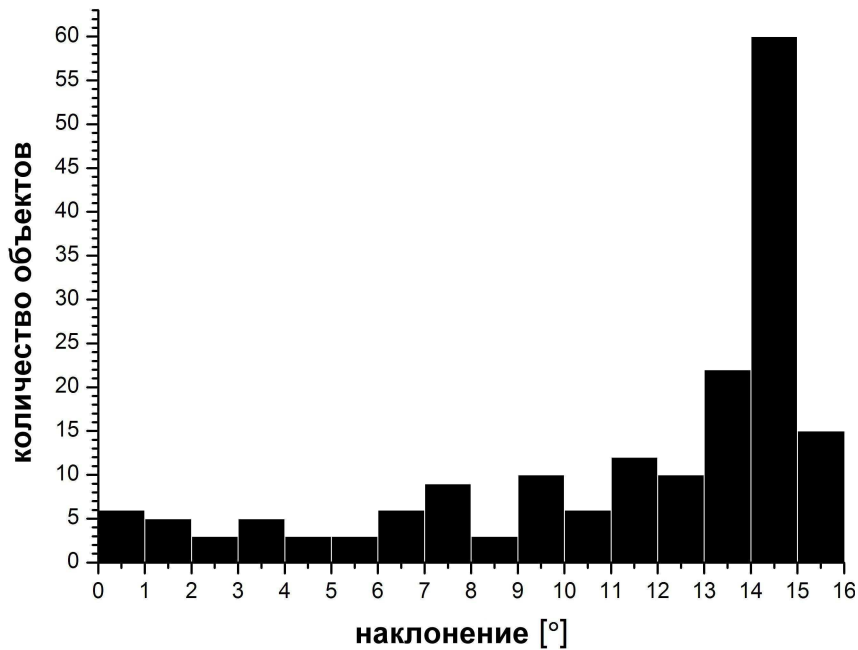


Рис. 2.2. Распределение объектов космического мусора по величинам угла наклонения.

жит в диапазоне от  $0^\circ$  до  $\sim 15^\circ$ . На Рис. 2.2 общее количество наблюдавшихся фрагментов КМ относительно равномерно распределено по углам наклонения их орбит, единственный ярко выраженный пик приходится на значения наклонения  $14-15^\circ$ . Это связано с тем, что объекты, поднимающиеся на высоту  $15^\circ$  градусов над горизонтом, удобно наблюдать с пунктов на наших широтах. Возле экватора объекты КМ движутся по орбите с наибольшей скоростью, достигающей сотен секунд дуги в секунду времени. Это неудобно при наблюдениях приёмниками излучения с небольшими полями зрения (до 1 кв. градуса). В момент кульминации над экватором фрагменты космического мусора зависают, их изображение на ПЗС-кадре становится точечным (см. Рис. 1.2(б), Гл. 1), что удобно как для измерений блеска, так и для высокоточных координатных измерений. Измерение координат объектов на большой дуге вблизи точек зависания позволяет построить предварительную орбиту, которая затем уточняется новыми наблюдениями. Кроме того, на орбитах с  $i \sim 15^\circ$  находятся объекты КМ,

Таблица 2.1. Распределение наблюдавшихся объектов космического мусора по величине эксцентриситета.

<b>эксцентриситет</b>	<b>количество объектов</b>
$0.0001 < e < 0.001$	6
$0.001 < e < 0.003$	26
$0.003 < e < 0.006$	34
$0.006 < e < 0.01$	27
$0.01 < e < 0.04$	51
$0.04 < e < 0.1$	24
$0.1 < e < 0.2$	7
$e \approx 0.21$	1
$0.3 < e < 0.4$	3
$e \approx 0.44$	1

образовавшиеся достаточно давно. Эволюция ГСО со временем приводит к увеличению угла наклона, что в свою очередь способствует накоплению объектов в областях с большими наклонами.

В таблице 2.1 показано распределение наблюдавшихся в 2014-2015 гг. фрагментов космического мусора по величине эксцентриситета. В основном наблюдаются фрагменты, эксцентриситеты орбит которых не превышают значения 0.2. Фрагменты КМ с большими эксцентриситетами вблизи области ГСО по всей вероятности являются побочными продуктами выводов действующих аппаратов на околоземные орбиты.

На основе позиционных наблюдений объектов, полученных в рамках каждого сеанса, нами было выполнено дифференциальное улучшение элементов орбит. Во многих случаях вместе с поправками к элементам орбиты удалось получить оценки отношения площади миделева сечения объекта к его массе —  $A/m$ .

Для действующих искусственных спутников Земли отношение площади миделева сечения к массе составляет порядка  $0.01 \text{ м}^2/\text{кг}$  [42, 58]. Зна-

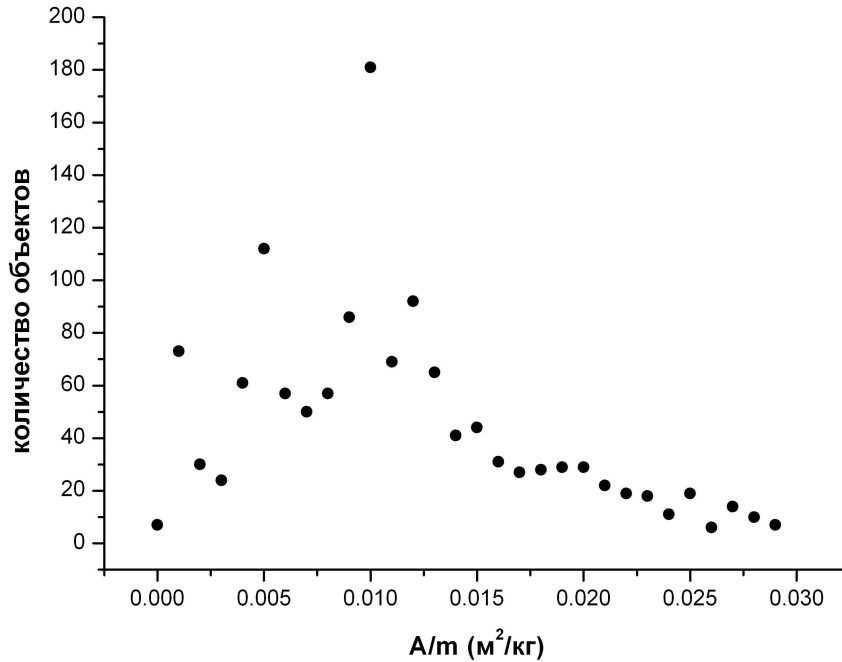


Рис. 2.3. Распределение геостационарных фрагментов КМ по величине  $A/m$  в диапазоне  $0.001 \dots 0.030 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

чение  $A/m$  для образующихся фрагментов космического мусора как минимум на порядок выше. Движение таких фрагментов подвержено влиянию светового давления, которое может быть учтено и исследовано при наличии представительного ряда наблюдательных данных в течение нескольких лет.

Существенное влияние на эволюцию орбит фрагментов КМ световое давление оказывает при значениях  $A/m$  больше  $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Чем больше значение парусности, тем больше амплитуда колебаний значений эксцентриситета и наклона орбиты объекта. Для фрагментов с парусностью от  $1$  до  $50 \text{ м}^2/\text{кг}$  влияние светового давления выходит на второе место по величине после возмущений от гравитационного поля Земли [17].

На рис. 2.3-2.4 показано распределение каталогизированных геостационарных фрагментов КМ (ГС-фрагменты) по величине отношения  $A/m$ . К ГС-фрагментам относятся объекты, расположенные в области геостационарной орбиты - последствия разрушения геостационарных ИСЗ.

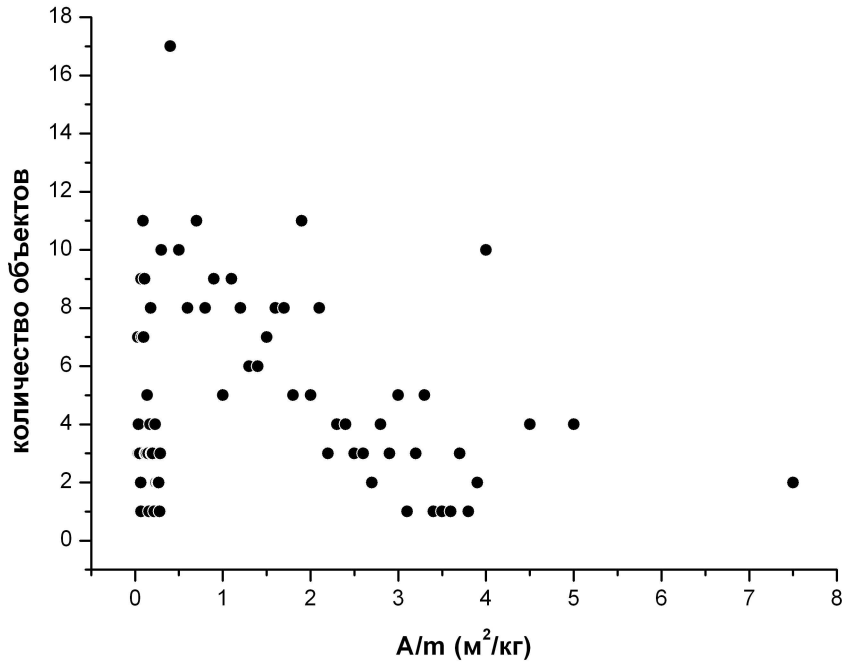


Рис. 2.4. Распределение геостационарных фрагментов КМ по величине  $A/m$  в диапазоне  $0.1 \dots 8 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

На Рис. 2.3 показано количественное распределение геостационарных объектов по малым величинам отношения площади миделева сечения к массе. В данном диапазоне величин  $A/m$  наибольшее количество геостационарных фрагментов в каталоге КМ обладает парусностью, близкой по величине к отношению  $A/m$  функционирующих ИСЗ.

На Рис. 2.4 показано количественное распределение геостационарных объектов по большим величинам отношения площади миделева сечения к массе. Здесь отмечены фрагменты КМ, обладающие сложной геометрической формой, при оценке параметров движения которых необходимо учитывать влияние светового давления.

Кроме объектов, движущихся в области ГСО, на высоких орбитах существуют также объекты, пересекающие геостационарную зону, но не относящиеся к ней. В раздел негеостационарных фрагментов КМ (НГС-фрагменты) входят объекты на высокоэллиптических орбитах с величинами эксцентриситетов до 0.8, значениями большой полуоси в диапазоне







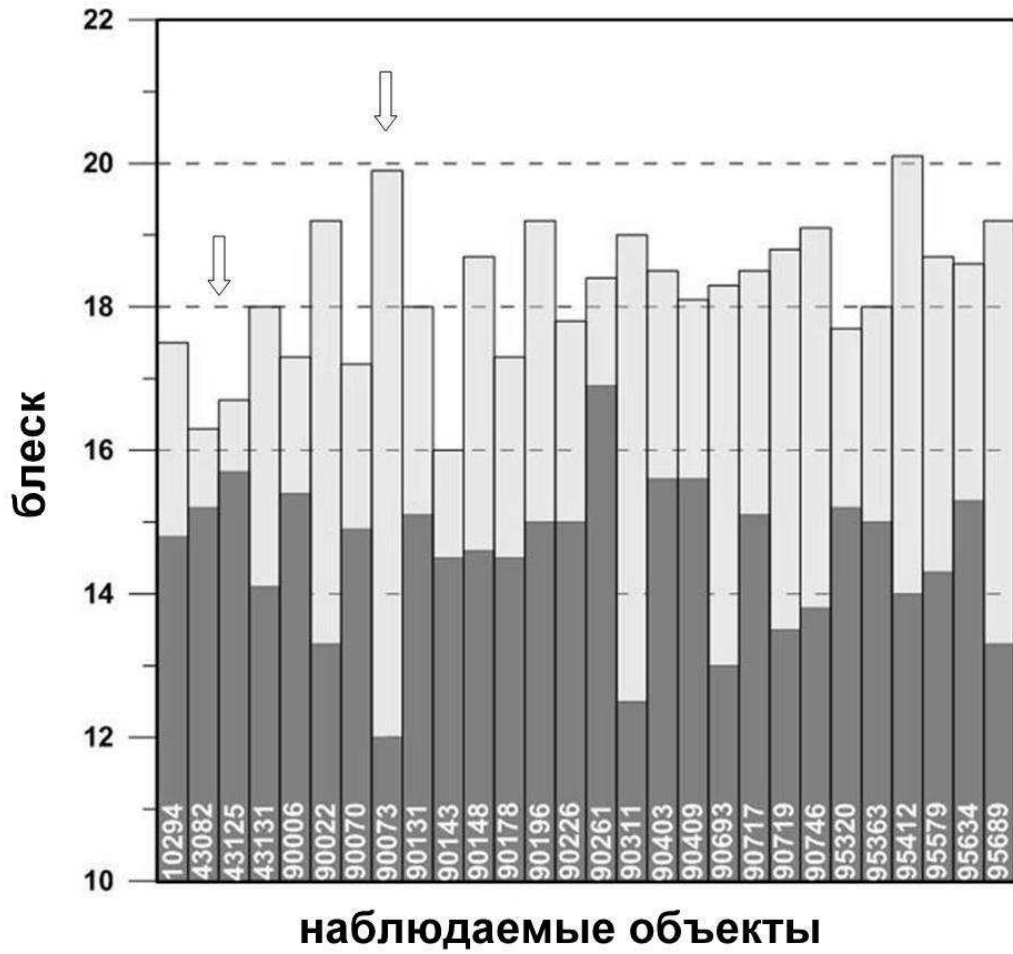


Рис. 2.7. Изменение блеска фрагментов КМ в геостационарной области по данным оптических измерений.

порядок в списке	объект	прохождений наблюдений	интервал в сутках
90073	61	2078	2441
90008	14	259	2241
90031	14	274	2241
90032	18	442	2241
90006	11	143	2240
90028	7	111	2239
43124	3	30	2225
90009	8	267	2043
90022	18	355	2043
11581	2	24	2041
43165	11	253	2020
90025	9	214	1769
90114	14	265	1662
90089	12	306	1656
90023	11	315	1654
95334	9	954	1653
90057	9	260	1523
90158	11	226	1523
43103	10	170	1522

пункт	дата	первый момент каждого прохождения	время UTC	N
10012	2009 06 11	20 43	20.500	30
10012	2009 10 16	19 50	49.000	266
10012	2009 10 17	22 02	05.000	103
10012	2009 10 18	16 50	04.500	37
10012	2009 10 19	16 38	47.500	46
10012	2009 10 20	19 15	28.000	206
10012	2009 10 21	19 11	11.000	43
10012	2013 12 18	23 28	28.500	118
10012	2013 12 19	21 19	56.000	105

Рис. 2.8. Окно каталога наблюдаемых объектов космического мусора.

Измерения блеска объектов проводятся при хорошем состоянии неба в течение всей ночи на разных фазовых углах при экспозиции 1-2 с. Период обращения космических аппаратов составляет несколько минут (6 минут у функционирующих аппаратов), соответственно можно считать, что измерение блеска при коротких экспозициях происходит почти мгновенно. Поглощением атмосферы при привязке объектов на ПЗС-изображении можно пренебречь, поскольку звёзды отождествления и космические объекты в кадре находятся на одинаковых зенитных расстояниях.

Полученные после обработки ПЗС-изображений орбитальные параметры и оценки блеска сводятся в наблюдательный каталог космического мусора, который от сеанса к сеансу пополняется новыми объектами и уточнёнными орбитами уже имеющихся в каталоге фрагментов (см. Рис. 2.8).

На Рис. 2.8 показано окно наблюдательного каталога объектов космического мусора. Выпадающее из списка объектов меню содержит в себе номера объектов, моменты времени, измеренные координаты и оценки блеска для каждой наблюдательной сессии.

**По результатам Главы 2 на защиту выносятся следующее положение:**

Получен уникальный шестилетний наблюдательный материал объектов космического мусора в геостационарной области и на высокоэллиптических орбитах. Полученные измерения координат соответствуют точности, необходимой для изучения долгосрочной орбитальной эволюции объектов.

Получен массив физических и орбитальных характеристик малоразмерных объектов космического мусора сложной формы на высоких орбитах. Данные массива объектов космического мусора используются для последующего сопровождения и уточнения орбитальных параметров.

### **3. Обнаружение и изучение ранее не наблюдавшихся малоразмерных фрагментов космического мусора**

#### **3.1. Обнаружение ранее не наблюдавшихся объектов.**

##### **Возможности обнаружения на Zeiss-2000**

Проблема заполнения геостационарной области космическим мусором делает актуальными поисковые наблюдения новых фрагментов, в том числе малоразмерных - последствий космических разрушений и столкновений. Научный интерес представляет анализ их орбитального движения и оценок блеска. В данной части работы приведены результаты обработки наблюдений и исследований движения неизвестных ранее объектов в геостационарной области, в том числе на высокоэллиптической орбите и в областях скопления фрагментов разрушения искусственных спутников Земли.

Новые объекты геостационарной области, ранее не наблюдавшиеся наземными средствами, обнаруживаются практически в каждом наблюдательном сеансе на Терскольской обсерватории. В фотометрические ночи обнаруживаются четыре-пять новых, ранее не наблюдавшихся фрагментов космического мусора. При обнаружении неизвестного объекта проводится измерение его топоцентрических координат и блеска в течение часа-полутора часов. По данным сопровождения в первую ночь строится предварительная орбита, которая позволяет спрогнозировать движение объекта на следующую ночь. Обнаружение фрагмента по этим эфемеридам в следующую ночь необходимо для получения уточнённой орбиты на эпоху наблюдений. Орбита, полученная по высокоточным позиционным наблюдениям в течение трёх ночей, считается достоверно определённой, и объект,

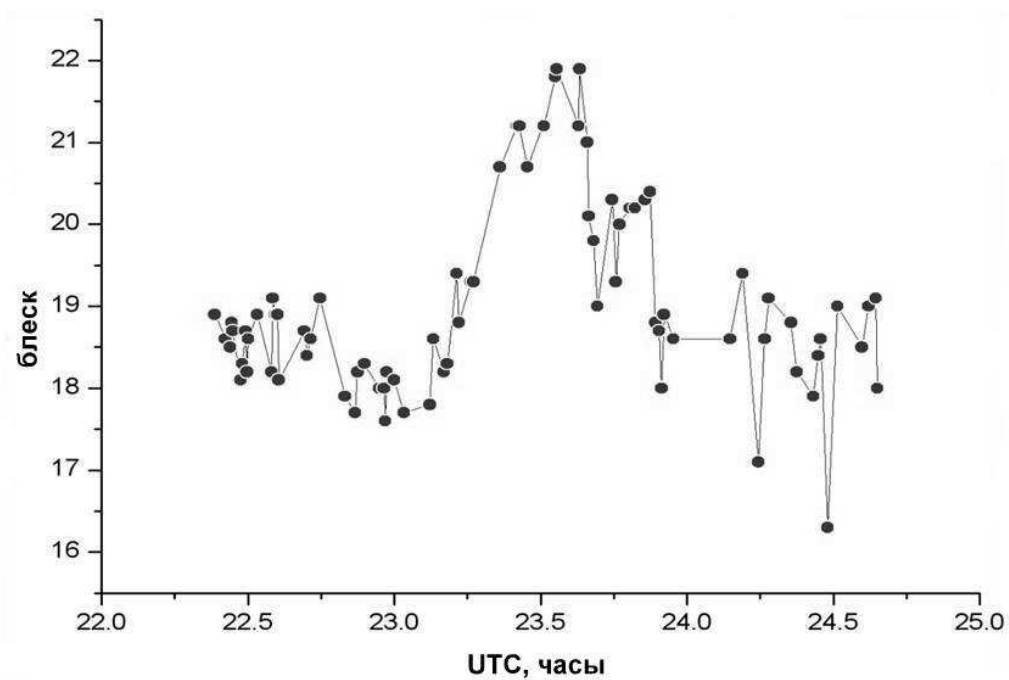


Рис. 3.1. Изменение блеска малоразмерного фрагмента 77100 по наблюдениям в ночь 6/7 сентября 2012 г.

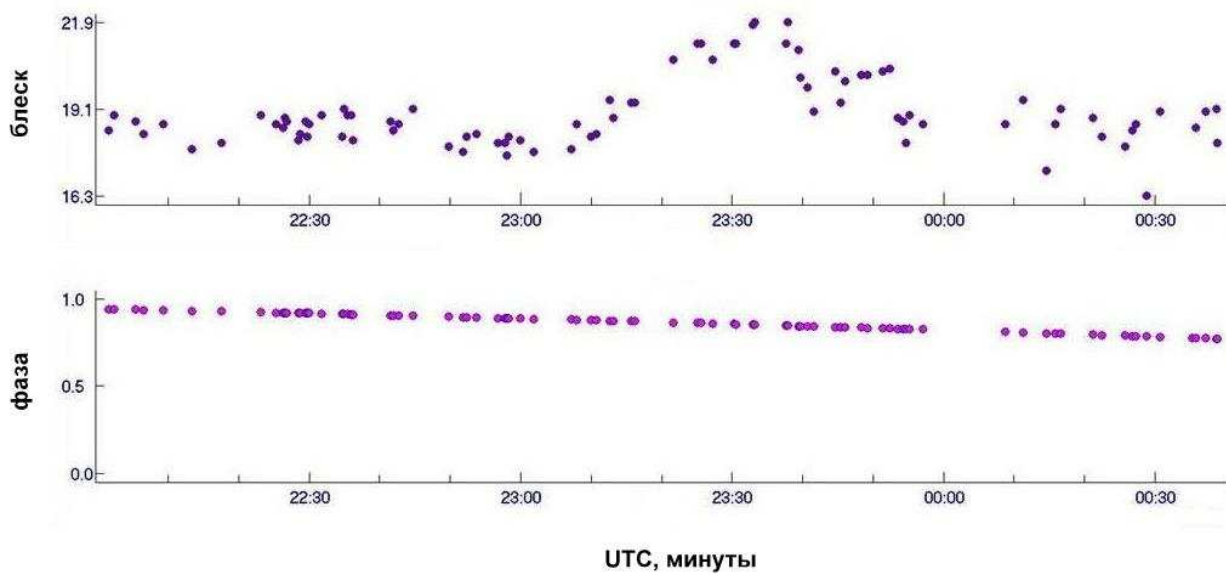


Рис. 3.2. Изменение блеска (вверху) и фазы (внизу) объекта 77100.

для которого она была получена, заносится в каталог с постоянным номером.

В 2012 году впервые на Терскольской обсерватории проведены измерения блеска объекта в геостационарной области с минимумом блеска слабее 21-й звёздной величины, что соответствует размеру отражающей площади менее 10 см (Рис. 3.1). Объект с временным номером 77100 является собой пример многочисленной малоразмерной фракции (10 см и менее) космического мусора, популяция которой велика на всех активно осваиваемых высотах околоземного космического пространства.

На Рис. 3.2 показаны оценки блеска и изменение фазы объекта в ночь наблюдений.

На основе 88 измеренных положений и оценок блеска были вычислены средние элементы предварительной орбиты объекта 77100:

**эпоха:** 06.09.2012 00:00:00.000

**большая полуось:** 42793.3 км

**эксцентриситет:** 0.13751

**угол наклона:** 5.042°

**долгота восходящего узла:** 328.726°

**аргумент перигея:** 243.912°

**средняя аномалия:** 191.078°

**среднее движение:** 0.980671 оборотов за сутки

С помощью полученных средних элементов предварительной орбиты были вычислены остаточные отклонения координат (О-С), они показаны на Рис. 3.3.

На короткой дуге наблюдений максимальные разности вычисленных положений и измеренных значений находятся на уровне 0.5".

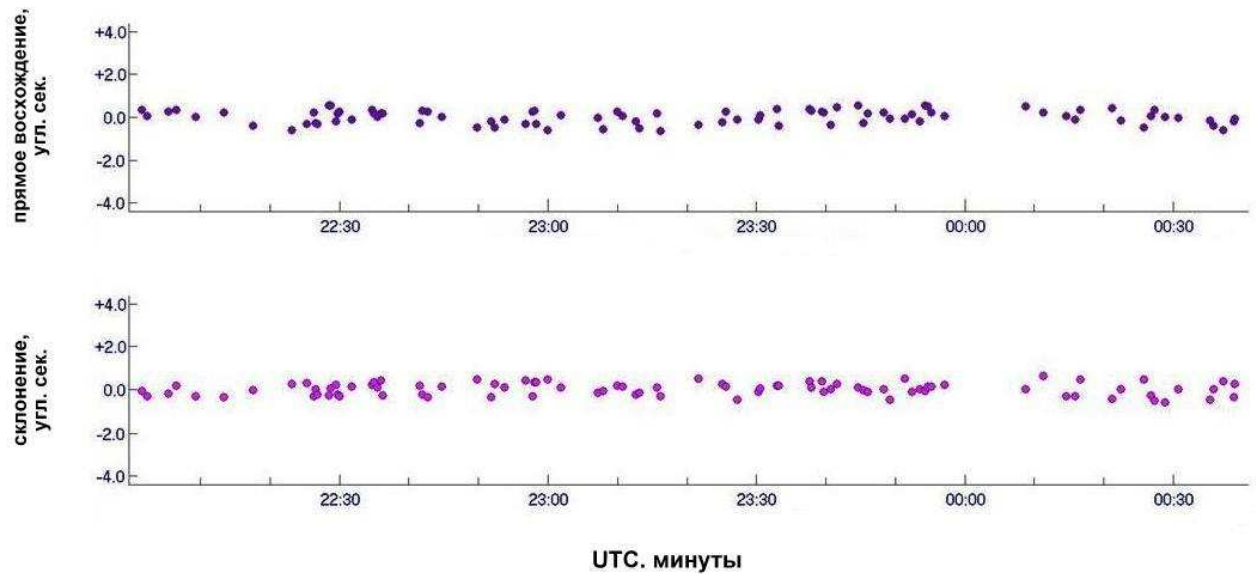


Рис. 3.3. Отклонения прямого восхождения и склонения объекта 77100 от вычисленных положений.

Числовое значение большой полуоси предварительной орбиты соответствует значению большой полуоси "типичной орбиты", на которую в результате маневра перемещают геостационарные спутники после окончания срока активной работы.

Подобные объекты оказываются труднодоступными для наблюдений на небольших телескопах по причинам слабости блеска и большой амплитуды его изменения. Столкновение с частицами такого размера одинаково опасно для всех функционирующих аппаратов в околоземном пространстве. Возможность наблюдения и сопровождения таких слабых объектов позволяет повысить степень изученности геостационарной области.

### 3.2. Обнаружение и исследование неизвестного объекта 95334 в геостационарной области

В качестве примера проведения наблюдения и сопровождения неизвестного объекта на геостационарной орбите можно привести обнаружение и исследование объекта 95334.

16 октября 2009 года во время плановых наблюдений (с целью под-



Таблица 3.1. Статистика наблюдений объекта 95334.

<b>Дата</b>	<b>Продолжительность наблюдений</b>	<b>Число точек</b>
16.10.2009	1.5 часа	260
17.10.2009	1.4 часа	103
18.10.2009	8 мин.	16
	4 мин.	12
	6 мин.	9
19.10.2009	4 мин.	14
	4 мин.	19
	4 мин.	13
20.10.2009	21 мин.	96
	16 мин.	81
	7 мин.	29
21.10.2009	15 мин.	32
	3 мин.	11

тверждения орбитальных характеристик) фрагментов космического мусора на комплексе Цейсс-2000 Терскольской обсерватории нами был обнаружен неизвестный объект 18-й звёздной величины. В результате обработки были определены параметры предварительной орбиты, с помощью которых выполнен прогноз движения на следующую наблюдательную ночь. 17 октября объект был найден в четырёх угловых минутах от предвычисленного положения.

Объект получил постоянный номер 95334 в Динамической базе данных Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), наблюдался в течение шести ночей, вплоть до его ухода из зоны видимости 21 октября 2009 года. Были получены измерения для 695 положений, выполнено улучшение предварительных элементов орбиты, произведена оценка коэффициента отношения средней площади миделева сечения объекта к его массе. Наблюдательная статистика объекта приведена в таб-

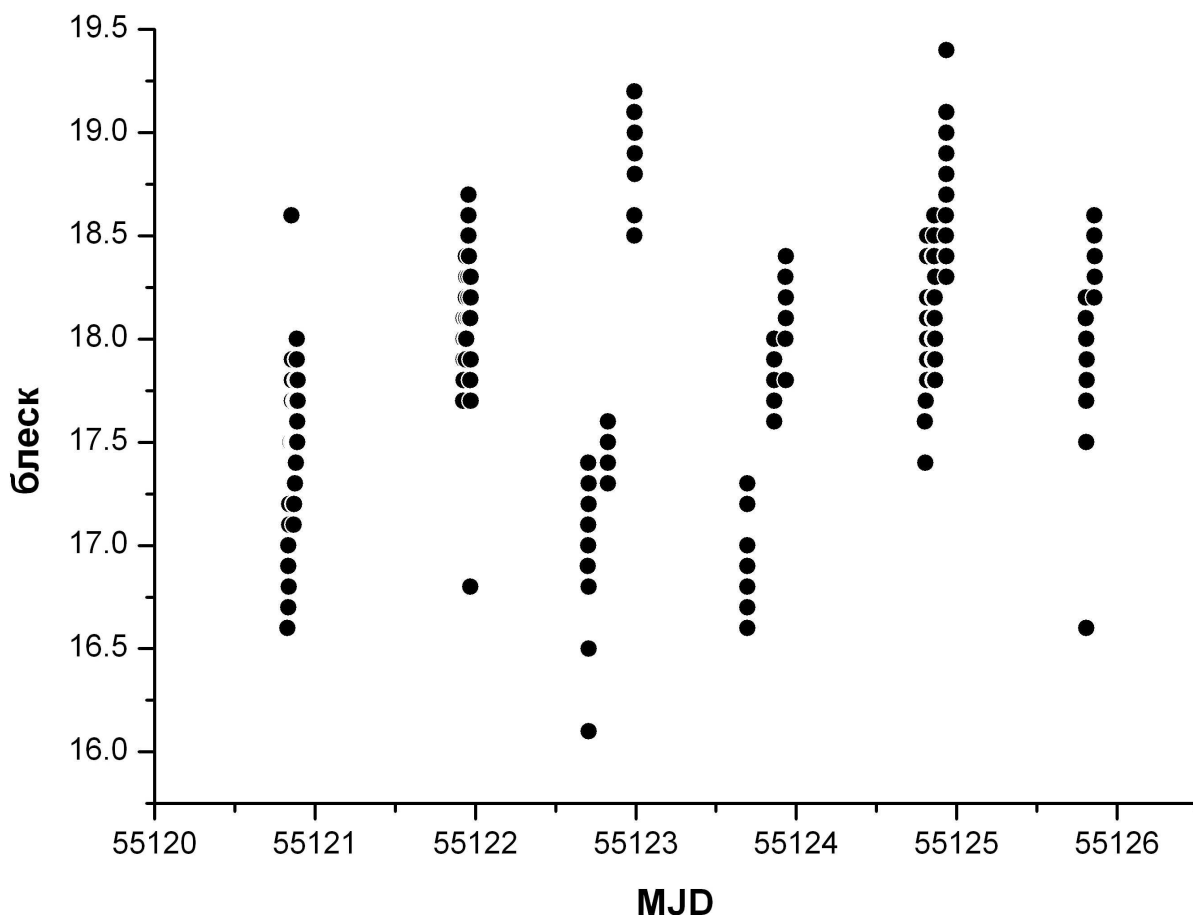


Рис. 3.4. Оценки блеска объекта 95334 за весь сеанс наблюдений в октябре 2009 г.

лице 3.1. Объект наблюдался продолжительными сеансами в первые две ночи после обнаружения, на третью ночь было достаточно получить измерения координат объекта короткими сериями, разнесёнными во времени.

На Рис. 3.4 показано изменение блеска объекта 95334 за всё время его наблюдений в сеансе обнаружения в октябре 2009 г. По оси ординат показана оценка блеска в интегральных звёздных величинах, по оси абсцисс - время измерения в модифицированных юлианских датах.

За весь наблюдательный период в октябре 2009 года блеск объекта менялся от  $16.5^m$  до  $19.5^m$ . В момент обнаружения - ранним вечером 16 октября - объект обладал наибольшей яркостью за период наблюдений в октябре 2009 г.

На примере объекта 95334 приведём методику оценки точности про-

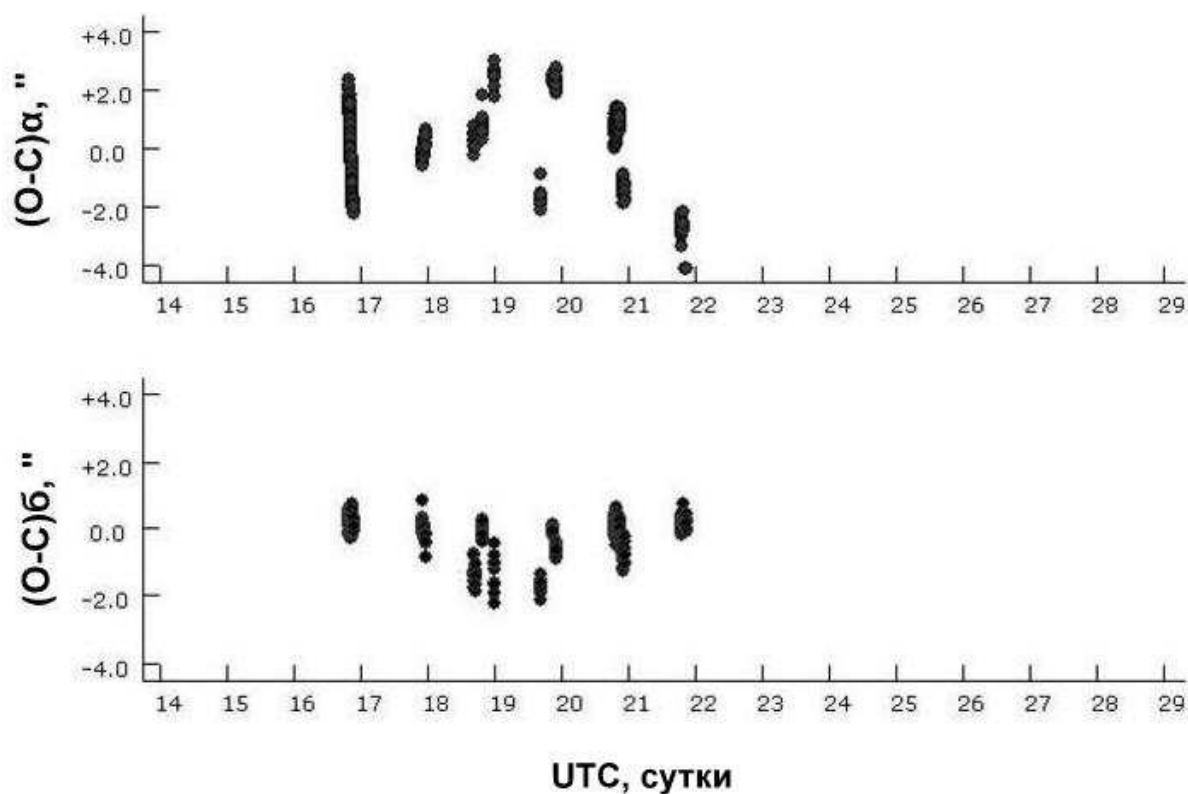


Рис. 3.5. Средние квадратические отклонения по прямому восхождению и склонению для объекта 95334 за 16-21 октября 2009 года.

водимых нами наблюдений объектов КМ и результаты этой оценки.

На Рис. 3.5 представлены средние квадратические отклонения по прямому восхождению и склонению за все ночи наблюдений. По оси абсцисс отложено время в долях суток, по оси ординат - значения СКО. Оценки средних значений невязок составили: по прямому восхождению -  $1.40''$ , по склонению -  $0.44''$ .

Полученные невязки грубее точности нашей аппаратуры (около  $0.15''$ , см. Гл. 1), что с некоторой вероятностью связано с большим значением коэффициента отношения средней площади миделева сечения к массе объекта, который, по нашим оценкам, составляет  $2.2 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

На Рис. 3.6 приведены невязки на коротких сериях наблюдений объекта 95334, а именно 5.5 минут и 4 минуты (слева и справа на каждом из графиков соответственно).

Среднеквадратические ошибки наблюдений на коротких сериях со-

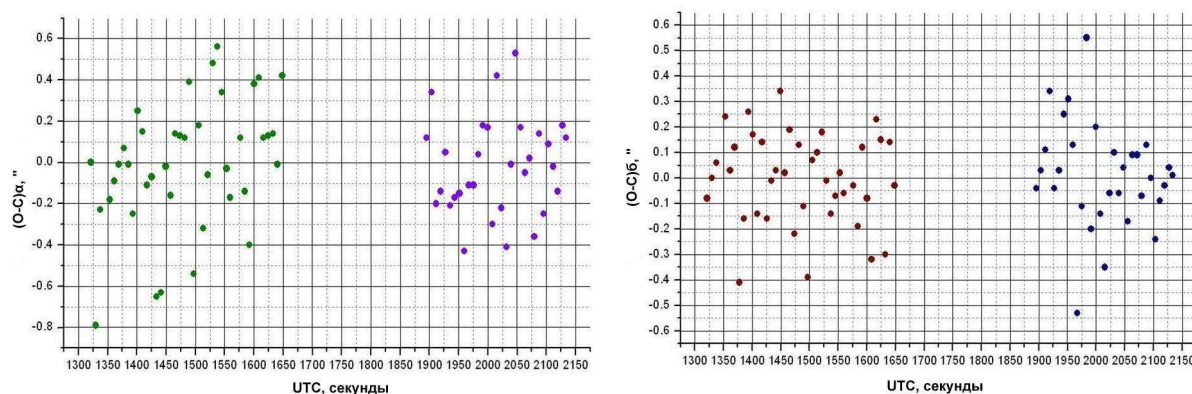


Рис. 3.6. Невязки, определённые на коротких сериях наблюдений объекта 95334. Слева - по прямому восхождению (а). Справа - по склонению (б).

Таблица 3.2. Параметры орбиты объекта 95334.

Дата	16.10.2009
$UT$	$00^h 00^m 00^s$
$a$	$41715.137 \pm 0.020$ км
$e$	$0,029916301^\circ \pm 0.00001$
$i$	$14.005113^\circ \pm 0.0002^\circ$
$\Omega$	$347.868781^\circ \pm 0.0002^\circ$
$\omega$	$163.477533^\circ \pm 0.003^\circ$
$M$	$307.308140^\circ \pm 0.003^\circ$
$A/m$	$2.2206 \pm 0.005$ м <sup>2</sup> /кг

ставляют  $0.31''$  и  $0.23''$  за 5.5 минут и  $0.18''$  и  $0.20''$  за 4 минуты по прямому восхождению и склонению соответственно. Эти оценки позволяют нам судить о внутренней точности наших позиционных измерений при хороших наблюдательных условиях.

В Таблице 3.2 приведены оскулирующие кеплеровские элементы орбиты объекта в системе истинного экватора даты. В последней строке дана оценка отношения площади миделева сечения объекта к его массе.

В первый вечер наблюдений было выполнено 260 измерений, общая продолжительность сеанса наблюдений составила 95 минут. Вычисление значений топоцентрических координат объекта в небесной системе отсчёта

Таблица 3.3. Анализ сеансов наблюдений объекта 95334.

Дата	Время	$\Delta t$	$N$	$M(\Delta\alpha)$	$\sigma(\Delta\alpha)$	$M(\Delta\sigma)$	$\sigma(\Delta\delta)$
2009/10/16	19:50	95.0	260	-0.37	0.23	0.20	0.16
2009/10/17	22:02	14.1	65	-0.36	0.13	0.03	0.12
2009/10/17	22:33	6.1	18	-0.10	0.11	-0.22	0.09
2009/10/17	22:57	22.1	20	0.00	0.16	-0.23	0.15
2009/10/18	16:50	8.0	16	0.24	0.21	-1.50	0.23
2009/10/18	19:47	3.5	12	0.55	0.28	-0.01	0.19
2009/10/18	23:46	5.2	9	2.56	0.16	-1.53	0.50
2009/10/19	16:38	4.6	14	-1.87	0.24	-1.99	0.19
2009/10/19	20:38	3.7	19	2.32	0.09	-0.03	0.07
2009/10/19	22:22	4.1	13	2.18	0.25	-0.67	0.15
2009/10/20	19:15	20.6	96	0.77	0.27	0.12	0.18
2009/10/20	20:30	16.2	81	0.99	0.19	0.11	0.16
2009/10/20	22:22	6.9	29	-1.26	0.23	-0.67	0.27
2009/10/21	19:11	14.6	32	-2.71	0.22	0.06	0.16
2009/10/21	20:35	3.3	11	-4.41	0.19	0.24	0.14

было выполнено на основе улучшенных элементов орбиты из Таблицы 3.2. В следующие пять вечеров измерения положений объекта 95334 выполнялись отдельными сеансами продолжительностью от 3 до 20 минут.

За шесть ночей было выполнено 15 отдельных сеансов наблюдений. В Таблице 3.3 представлены результаты линейного регрессионного анализа невязок измерений для каждого сеанса. Невязки  $\Delta\alpha \cdot \cos \delta$  и  $\Delta\delta$  были аппроксимированы линейными функциями по времени. Получены оценки  $M(\Delta\alpha)$ ,  $M(\Delta\delta)$  средних значений невязок и оценки  $\sigma(\Delta\alpha)$ ,  $\sigma(\Delta\delta)$  средних квадратических отклонений невязок от аппроксимирующей прямой линии. В первой колонке таблицы указаны дата и время начала сеанса наблюдений,  $\Delta t$  - продолжительность сеанса в минутах,  $N$  - количество положений.

Оценки СКО невязок по прямому восхождению и склонению от аппроксимирующей кривой в каждом сеансе наблюдений не превышают 0.5",

что говорит о хорошей точности координатных измерений.

В Таблице 3.4 приведена выборка из каталога позиционных наблюдений объекта 95334. Измеренные положения объекта были взяты в начале, середине и конце каждого суточного отрезка дуги, на который были получены наблюдения. Несмотря на то, что таблица содержит информацию лишь о 29 измеренных положениях, выборка является достаточно представительной. На основе этих данных и данных Таблицы 3.3 возможно улучшение предварительных элементов орбиты объекта и оценка отношения средней площади к массе  $A/m$  (см. Табл. 3.2).

Орбита объекта расположена ниже высоты геостационарной орбиты. Необходимо отметить, что средним движением 1.019 об/сут и близкими к элементам орбиты объекта 95334 значениями обладают также фрагменты разрушения ступени Transtage 3C, из чего можно предположить, что 95334 является одним из фрагментов семейства обломков этой ракеты-носителя [7]. Орбитальные данные фрагментов Transtage 3C для сравнения были взяты из каталога NORAD [66].

Результаты прогноза движения объекта показывают, что с периодом два месяца объект появляется в поле зрения пункта наблюдений. Время доступности объекта для наблюдений составляет несколько суток.

На основании проведённых наблюдений нами был сделан прогноз эволюции элементов орбиты объекта до конца 2016 г., что показано на Рис. 3.7. Можно отметить значительные колебания эксцентриситета и уменьшение угла наклона орбиты. Основной период изменения этих элементов равен примерно одному году. Как видно из Рис. 3.7, амплитуда изменения большой полуоси составляет 5 километров, амплитуда изменения эксцентриситета орбиты превышает величину 0.024.

Эффективность выполненных исследований заключается в высокой точности измерений и в том факте, что обнаруженный объект не был потерян после его открытия. Оценка отношения средней площади к массе

Таблица 3.4. Часть каталога положений объекта 95334.

Дата <i>y m d</i>	Время <i>h m s</i>	$\alpha(J2000.0)$ <i>h m s</i>	$\delta(J2000.0)$ ° ' "	$V$ <i>m</i>	$\Delta\alpha \cos \delta$ "	$\Delta\delta$ "
2009/10/16	19 51 02.000	02 46 57.760	+05 24 34.69	17.1	1.65	0.28
2009/10/16	19 57 27.000	02 53 26.060	+05 40 37.69	17.1	1.20	0.27
2009/10/16	20 05 00.000	03 01 04.700	+05 58 49.11	17.1	0.81	0.32
2009/10/16	20 13 09.000	03 09 21.880	+06 17 35.04	17.1	-0.03	0.57
2009/10/16	20 26 38.000	03 23 09.320	+06 46 32.39	17.1	0.10	0.42
2009/10/16	20 35 14.000	03 32 00.130	+07 03 35.93	17.1	-0.54	0.51
2009/10/16	20 55 25.000	03 52 55.190	+07 39 04.07	17.1	-1.20	0.22
2009/10/16	21 10 58.000	04 09 10.670	+08 01 49.06	17.1	-1.41	0.38
2009/10/16	21 24 47.000	04 23 43.250	+08 18 30.71	17.1	-2.08	0.18
2009/10/17	22 01 59.000	05 34 28.700	+08 45 28.71	17.1	-0.54	0.05
2009/10/17	22 33 16.000	06 08 18.000	+08 31 41.08	17.1	-0.67	-0.15
2009/10/17	22 57 22.000	06 34 27.420	+08 08 00.54	17.1	-0.57	-0.39
2009/10/17	23 19 27.000	06 58 27.490	+07 36 30.87	17.1	-0.25	-0.61
2009/10/18	16 49 58.500	00 47 11.450	-01 16 45.98	17.1	0.48	-0.73
2009/10/18	16 58 00.000	00 54 48.990	-00 48 19.09	17.1	0.08	-1.60
2009/10/18	19 51 20.000	03 46 41.180	+07 15 13.48	17.1	1.27	-0.04
2009/10/18	23 51 23.000	08 04 05.500	+05 26 40.85	17.1	1.27	-1.09
2009/10/19	16 43 19.500	01 08 15.760	-00 04 58.05	17.1	-1.30	-1.60
2009/10/19	22 24 45.000	07 01 01.130	+07 29 26.48	17.1	2.22	-0.60
2009/10/20	19 15 22.000	04 08 38.890	+07 34 50.96	17.1	0.92	0.28
2009/10/20	19 35 57.500	04 30 13.890	+08 00 09.18	17.1	2.08	0.61
2009/10/20	20 30 44.500	05 28 26.290	+08 31 02.11	17.1	1.46	0.26
2009/10/20	20 46 10.500	05 44 59.900	+08 29 43.61	17.1	1.72	0.32
2009/10/20	22 22 45.000	07 29 17.120	+06 40 15.77	17.1	-0.53	-0.73
2009/10/20	22 29 36.000	07 36 40.950	+06 26 08.20	17.1	-1.11	-0.38
2009/10/21	19 11 05.000	04 33 37.580	+07 57 13.90	17.1	-1.00	-0.03
2009/10/21	19 25 44.000	04 49 05.140	+08 10 06.44	17.1	-0.92	0.90
2009/10/21	20 37 15.000	06 05 29.840	+08 17 16.86	17.1	-3.10	0.11
средняя квадратическая погрешность					1.30	0.62

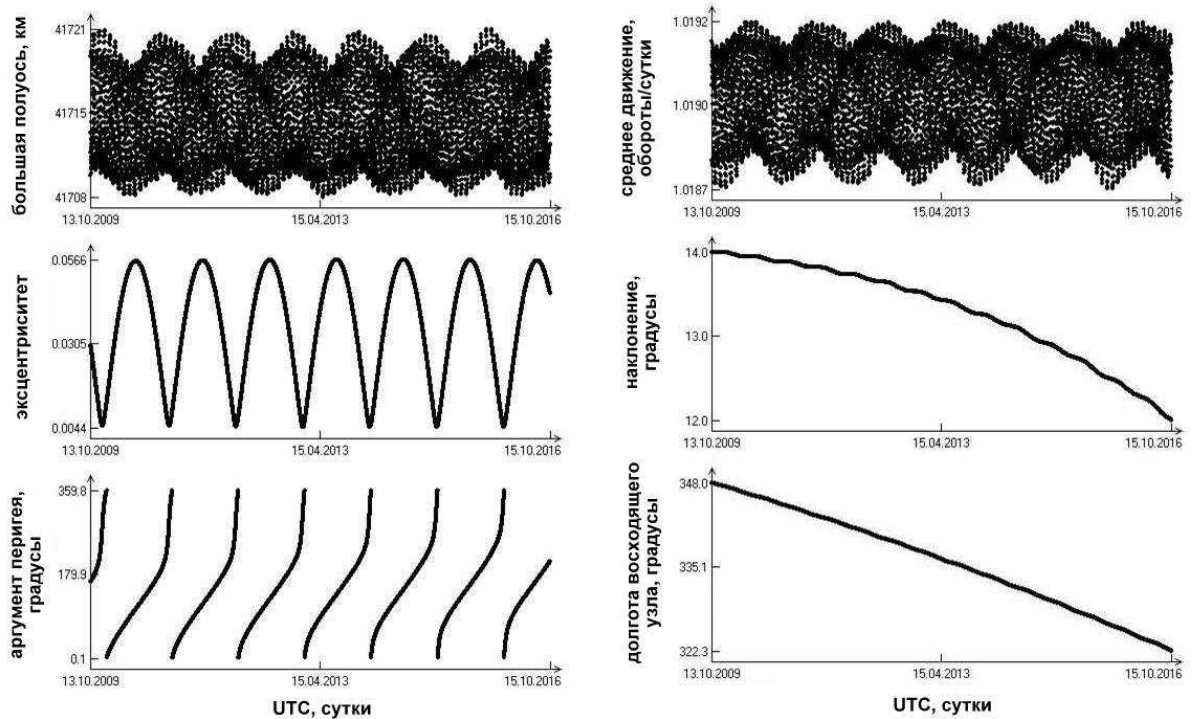


Рис. 3.7. Эволюция элементов орбиты объекта 95334 до 2016 года.

определена на основе измеренных положений и составляет значительную величину, равную приблизительно  $2.2 \text{ м}^2/\text{кг}$  (см. Табл. 3.2). Это значение определяет особенности эволюции параметров движения объекта, связанные со значительными возмущениями, обусловленными силой светового давления.

### 3.3. Результаты исследования нового объекта 95633 на ВЭО

В марте 2012 года в Звенигородской обсерватории ИНАСАН был открыт новый объект на высокоэллиптической орбите. В продолжение двух месяцев были получены длинные серии позиционных наблюдений. После надёжного определения параметров движения объект был занесён в динамический каталог высокоорбитальных космических объектов ИПМ им. М.В. Келдыша под номером 95633. В каталоге NORAD [39] этот объект отсутствует.

В статье [6] было отмечено, что объект показывает резкие колебания



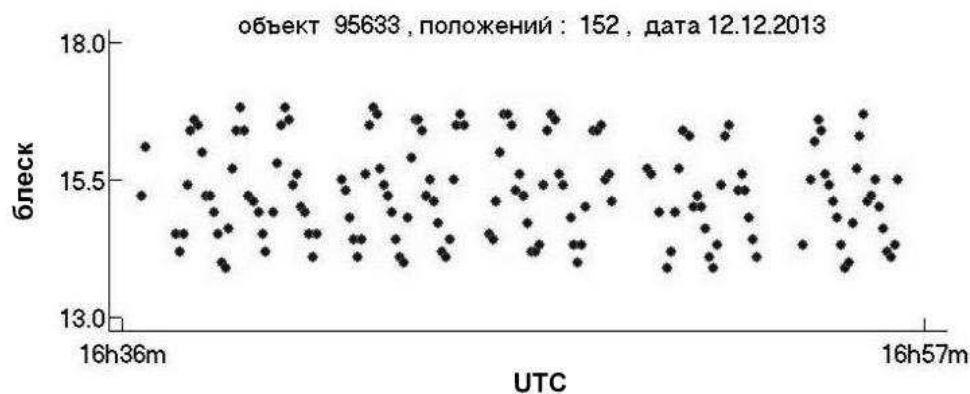


Рис. 3.8. Быстрые изменения блеска объекта 95633 по наблюдениям на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории.

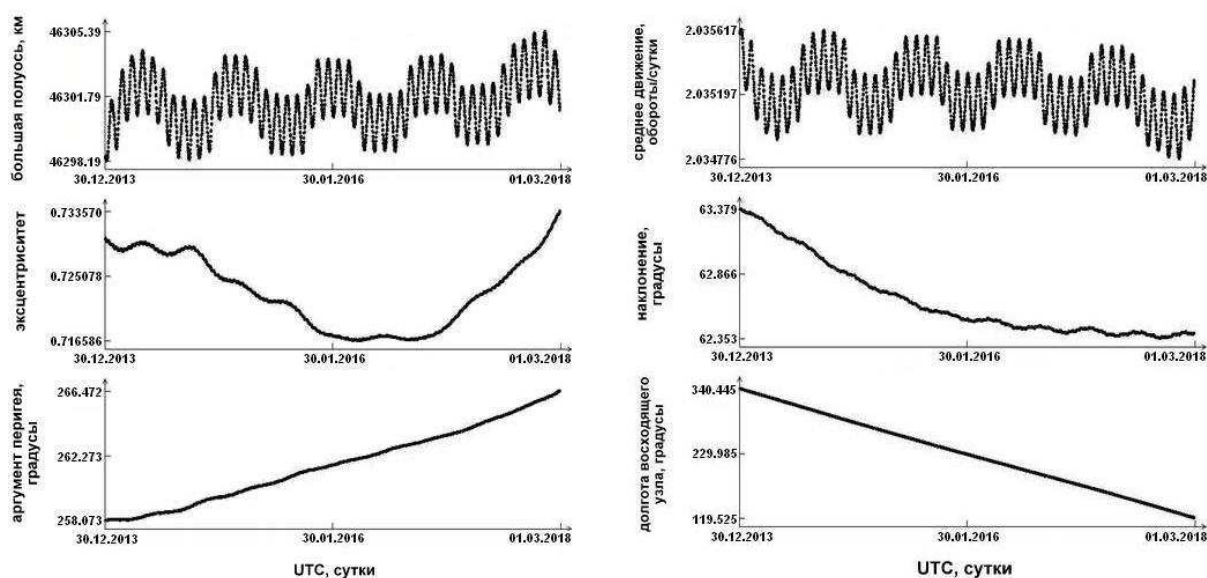


Рис. 3.9. Эволюция элементов орбиты объекта 95633 до 2018 года.

блеска в диапазоне от 12-й до 17-й звёздной величины. В декабре 2013 года в Терскольской обсерватории были выполнены измерения блеска данного объекта на протяжении 20 минут с интервалом между измерениями 6 секунд, результаты которых представлены на Рисунке 3.8. На графике видно, что блеск объекта в данном наблюдательном сеансе испытывает быстрые изменения с амплитудой порядка трёх звёздных величин.

Гармонический анализ полученных данных показал наличие двух основных периодов колебаний блеска: 4.5 минуты и 1.3 минуты. Амплитуда колебаний блеска этого объекта по измерениям в Терсколе меньше, чем амплитуда колебаний блеска, полученных по данным наблюдений в марте

2012 года в Звенигороде [6]. Среди причин уменьшения амплитуды вариаций блеска объекта по данным, полученным в Терсколе, можно указать на различия фазовых углов и топоцентрических расстояний при наблюдениях на этих двух обсерваториях.

На Рис. 3.9 приведены результаты прогноза эволюции параметров орбиты объекта 95633 до марта 2018 года. Было выявлено достижение критического значения эксцентриситета  $e = 0.75$  к началу 2018 года, когда исследуемый объект в точке перигея начнёт задевать плотные слои атмосферы. Дальнейшее сопровождение объекта в 2018 году нуждается в регулярных наблюдениях для своевременного уточнения орбиты и прогнозирования времени падения.

### **3.4. Результаты исследования новых объектов в областях скопления последствий разрушений**

Приведём результаты обработки измерений некоторых обнаруженных в 2015 году новых фрагментов космического мусора. На основе вычисленных предварительных элементов орбиты некоторые из них наблюдались в течение нескольких ночей. Массив полученных топоцентрических положений позволил определить для каждого фрагмента параметры движения и оценку отношения средней площади миделева сечения к массе объекта  $A/m$  в единицах  $\text{м}^2/\text{кг}$ . Результаты вычислений представлены в Табл. 3.5 и Табл. 3.6.

Номера объектов в таблицах условные. В графе "блеск" приведён диапазон изменений оценок блеска в интегральных звёздных величинах. Символом  $T$  обозначено количество наблюдательных ночей,  $N$  - число измеренных положений объекта.

Объекты 99900 и 99906 были измерены также на других пунктах и внесены в Динамическую базу данных с номерами 90846 и 90886 соответственно (см. Табл. 3.6).

Таблица 3.5. Характеристики новых объектов.

Объект	$a$ (км)	$A/m$ (м <sup>2</sup> /кг)	блеск (m)	$T$	$N$
66100	42218.2	4.69	13.9...17.9	3	360
66200	41857.9	0.62	18.2...19.8	4	753
66500	42090.4	—	15.1...18.7	1	212
66600	40931.0	—	13.4...20.8	1	402
66800	42029.3	11.28	16.5...20.8	3	429
67100	42235.1	—	13.2...17.1	1	160
99900	42268.2	19.16	16.3...18.1	7	621
99906	41780.6	0.01	15.4...18.5	1	102
99919	40075.5	4.39	15.6...19.5	2	113

В Табл. 3.6 даны средние элементы орбит объектов в моменты пересечения каждым из них экватора в восходящем узле. Вычисления выполнены на дату 1 ноября 2015 года (305-й день с начала года). К этой дате необходимо добавить часть суток, указанную в графе "время". Параметры движения, представленные в Таблице 3.6, по обозначениям и по алгоритму вычислений соответствуют двустрочным элементам базы данных NORAD [39]. Величина среднего движения  $n$  вычисляется в оборотах за сутки. В последней колонке даны значения географических долгот объектов на моменты вычислений. Измерения положений и блеска нескольких фрагментов выполнялись непрерывно на интервалах времени порядка одного часа.

Для четырёх фрагментов характерно большое численное значение отношения площади миделева сечения к массе (до 20 м<sup>2</sup>/кг). Из анализа Табл. 3.5 и Табл. 3.6 следует, что чем больше отношение площади миделева сечения к массе, тем больше эксцентриситет орбиты объекта.

На Рис. 3.10 и Рис. 3.11 представлены изменения блеска объектов 66600 и 67100 соответственно. По оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат отложена звёздная величина.

Таблица 3.6. Средние элементы орбит объектов.

Объект	время	$i$ ( $^{\circ}$ )	$\Omega$ ( $^{\circ}$ )	$e$	$\omega$ ( $^{\circ}$ )	$M$ ( $^{\circ}$ )	$n$ (об/сутки)	$L$ ( $^{\circ}$ )
<b>66100</b>	0.55757	13.397	312.613	0.042281	80.222	284.531	1.000763	71.371
<b>66200</b>	0.53035	13.952	343.994	0.016563	188.105	171.628	1.013828	112.579
<b>66500</b>	0.51342	14.058	323.817	0.045826	186.833	172.523	1.005378	98.512
<b>66600</b>	0.00133	5.990	309.449	0.028306	267.264	89.495	1.048466	269.002
<b>66800</b>	0.48821	9.339	296.319	0.228502	286.579	49.695	1.008642	82.329
<b>67100</b>	0.77377	8.572	257.509	0.567324	344.540	3.5592	1.001186	298.222
<b>90846</b>	0.69684	14.056	333.555	0.418631	273.774	40.720	1.002316	42.039
<b>90886</b>	0.50126	13.955	343.986	0.018115	188.871	170.809	1.016606	123.074
<b>99919</b>	0.55871	11.153	311.662	0.062092	275.795	77.168	1.082418	70.011

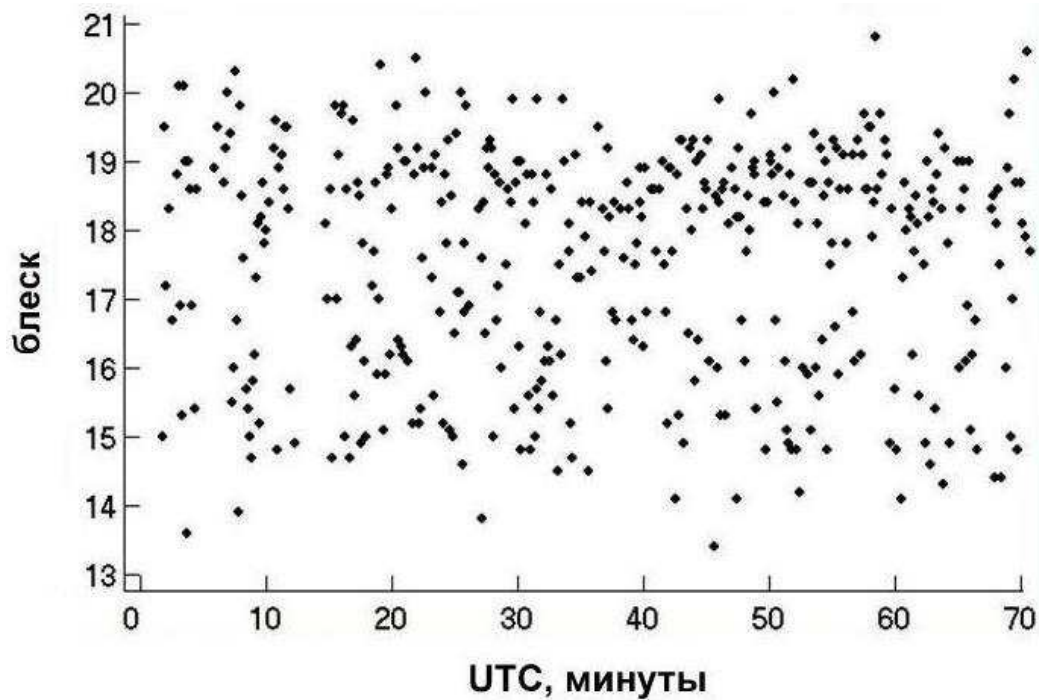


Рис. 3.10. Изменения блеска объекта 66600.

Фотометрические измерения подобных малоразмерных объектов космического мусора с амплитудой изменения блеска  $3^m$  и более необходимы для изучения особенностей характера изменений блеска и определения параметров вращения объекта вокруг центра масс. Уточнение этих физических характеристик позволяет облегчить задачу сопровождения и подтверждения орбит таких объектов.

При отождествлении фрагментов космического мусора на основе координатной информации наиболее значимыми для процедуры отождествления элементами орбиты являются углы наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла относительно плоскости экватора,  $i$  и  $\Omega$ , соответственно. В монографии [14] показано, что фрагменты космического мусора на диаграмме "долгота восходящего узла - угол наклона" образуют скопления. На Рис. 3.12 квадратами обозначены положения фрагментов объекта 68081E (РБ Transtage, взорвавшийся на ГСО в 1992 г. [13]). Элементы орбит фрагментов Transtage заимствованы в базе параметров движения NORAD [66]. Треугольник соответствует положению объекта 66600

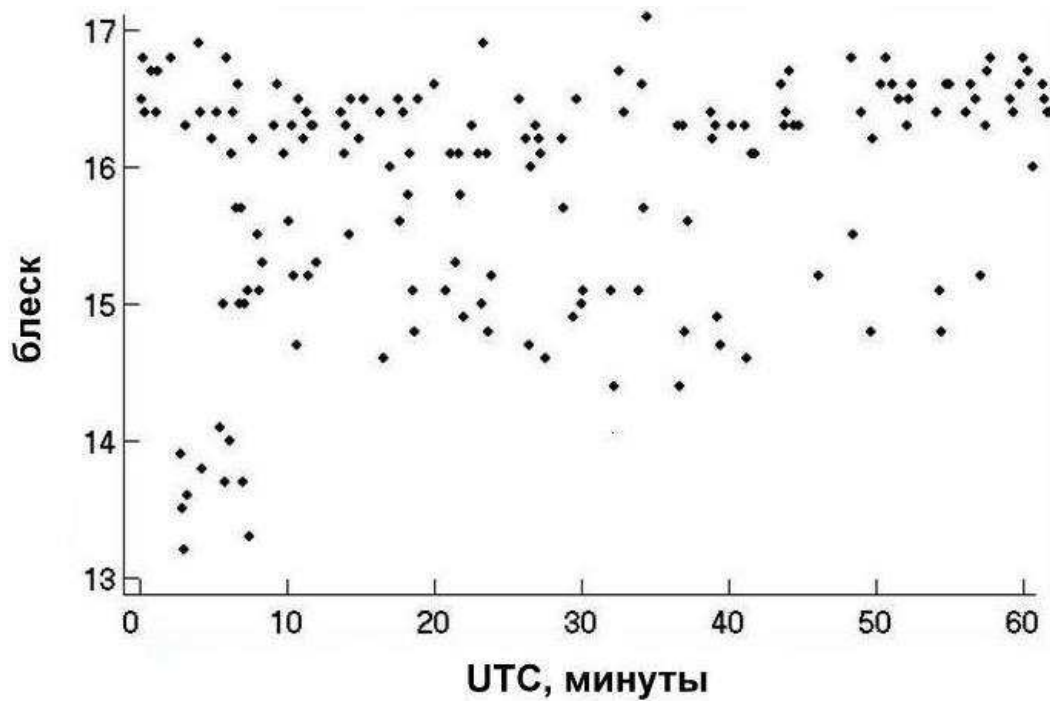


Рис. 3.11. Изменения блеска объекта 67100.

(Таблицы 3.5 - 3.6). По оси абсцисс отложены значения долготы восходящего узла в градусах. По оси ординат отложены значения угла наклона в градусах.

Весьма вероятно, что новый объект является одним из фрагментов разгонного блока с международным номером 68081E.

В ходе наблюдений в июле 2015 года было подтверждено открытие нового объекта с номером 90758. На Рис. 3.13 представлена диаграмма "долгота восходящего узла - угол наклона" для этого объекта. На диаграмме квадратами отражены положения фрагментов разгонного блока Transtage 68081E по состоянию на дату наблюдений объекта 90758 и положение объекта 90758 (треугольник).

В ходе наблюдательной сессии в ноябре 2014 года совместно с другими обсерваториями были открыты и на протяжении 5 ночей снабжены измеренными положениями 4 объекта. На диаграмме "долгота восходящего узла - угол наклона" (Рис. 3.14) эти объекты, обозначенные треугольниками, расположены в области скопления известных фрагментов разру-

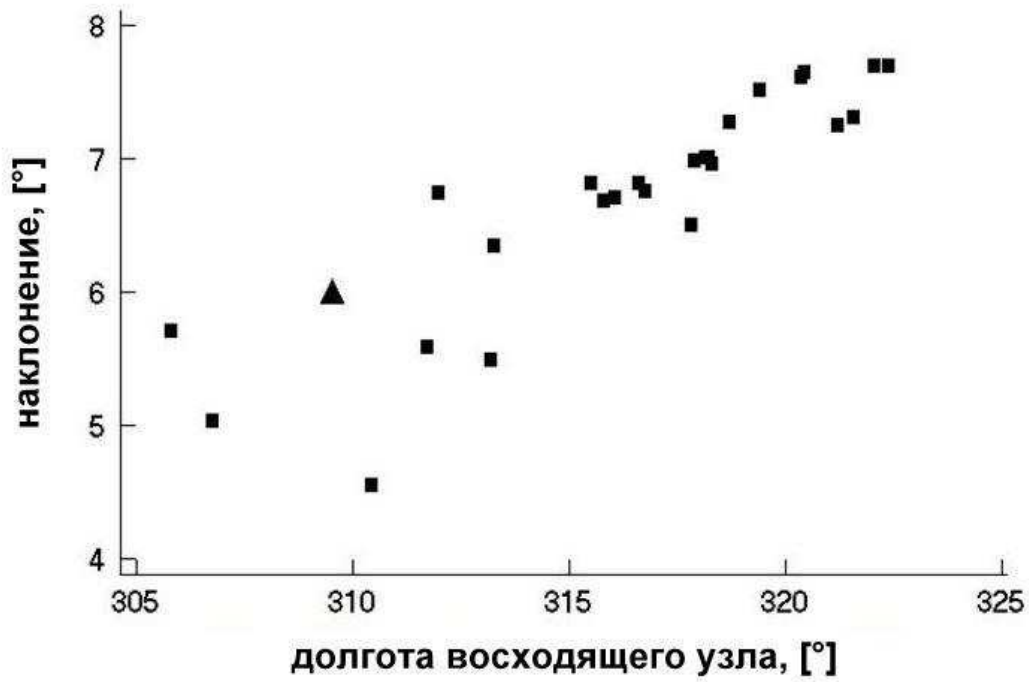


Рис. 3.12. Положения фрагментов разгонного блока Transtage и объекта 66600.

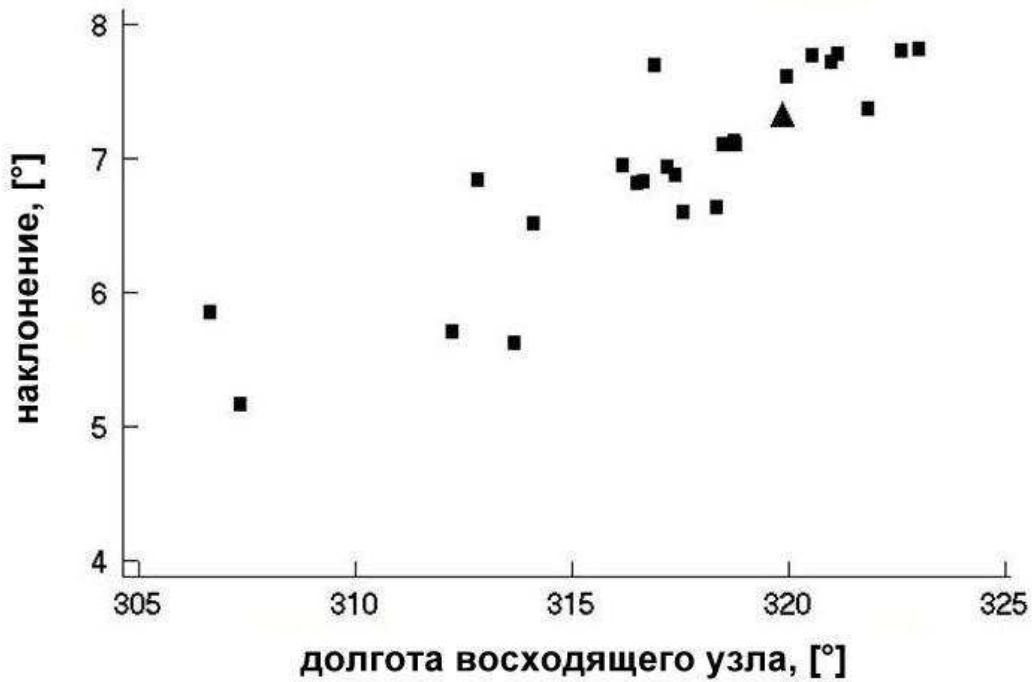


Рис. 3.13. Положения фрагментов разгонного блока Transtage и объекта 90758.

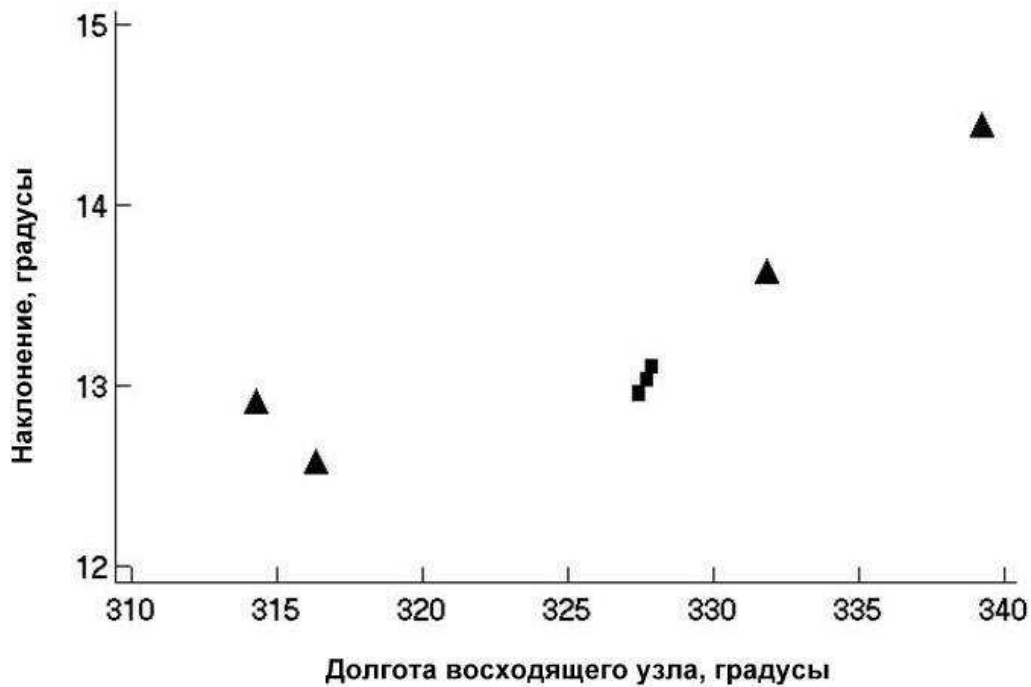


Рис. 3.14. Положения фрагментов разрушения 77092А и новых объектов.

шения спутника 77092А "Экран-2", обозначенных квадратами.

Необходимо дальнейшее сопровождение этих объектов и мониторинг всей области скопления фрагментов "Экран-2" для обнаружения вероятных новых объектов и изучения поведения уже известных последствий разрушения аппарата.

Проведённое исследование показывает значимость поисковых наблюдений объектов космического мусора. Советский спутник связи "Экран-2" взорвался в июне 1978 года, причиной инцидента называют бортовые аккумуляторные батареи. После взрыва в 1992 году на почти геосинхронной орбите ступени американской РН "Titan 3С Transtage" образовалось облако из более 500 осколков размером более 2 см [38]. Обнаружение спустя несколько десятилетий после взрывов фрагментов разрушений аппаратов подтверждает актуальность задачи поисковых наблюдений и мониторинга околоземного космического пространства, кроме всего прочего, и на предмет явления каскадного эффекта [43, 44].



**По результатам Главы 3 на защиту выносятся следующие положение:**

Обнаружены новые, ранее не каталогизированные объекты.

Определены их физические и орбитальные характеристики. Показано, что среди новых фрагментов есть неизвестные ранее обломки разрушений разгонного блока Transtage и спутника связи "Экран-2".

## 4. Модель изменения величины отношения площади миделева сечения к массе для объекта космического мусора

### 4.1. Общие сведения. Постановка задачи исследования объекта с большим отношением площади миделева сечения к массе на ГСО

Как уже было сказано, для большинства искусственных спутников Земли отношение площади миделева сечения к массе лежит в диапазоне 0.001-0.01 м<sup>2</sup>/кг [42]. Поэтому вековые изменения высоты орбиты для спутников на высоких орбитах сравнительно невелики, такие спутники будут занимать приблизительно один и тот же объём пространства в течение длительного периода времени. При разрушениях же космических аппаратов образующиеся фрагменты имеют гораздо большее отношение площади миделева сечения к массе - до 10-75 м<sup>2</sup>/кг [59].

Открытие класса объектов с большим отношением площади к массе положило начало целому ряду исследований объектов с большой парусностью, движущихся в окрестности геостационарной орбиты [34, 47, 58]. В работе [26] исследованы вековые изменения элементов орбиты ИСЗ под влиянием светового давления в зависимости от численного значения  $A/m$ . Сделан вывод о том, что на вековую эволюцию большой полуоси фрагментов с большим значением  $A/m$  световое давление оказывает наибольшее влияние, достигающее более сотни километров в год, что обуславливает изменение пространственного распределения таких объектов. Световое давление оказывает существенное влияние на эволюцию элементов орбиты для объектов со значением  $A/m$  более 1 м<sup>2</sup>/кг.

В настоящей главе проведено исследование фрагмента космического мусора в области геостационарной орбиты с большим отношением площади миделева сечения к массе. Этот объект интересен тем, что он является малоразмерным фрагментом космического аппарата Fengyun 2D (международный номер 2006-053A), движется в режиме либрации вокруг точки  $75^\circ$  в.д. с малой амплитудой и обладает переменным значением отношения площади миделева сечения к массе с максимальным значением около  $0.18 \text{ м}^2/\text{кг}$ . В статье [15] было замечено, что вблизи точки либрации  $75^\circ$  в.д. техногенная опасность для геостационарных космических аппаратов существенно выше, чем для КА, удалённых от этой точки. Это объясняется существованием известных КО, особо опасных для функционирующих аппаратов с точками стояния от  $70^\circ$  в.д. до  $80^\circ$  в.д. В статье приводятся такие объекты, как Луч 1-1, SIRIO 1, Galaxu 4, Радуга 32 и недавно открытый объект 90073, о котором далее пойдёт речь.

#### **4.2. Объект исследования и наблюдательный материал**

В Динамической базе данных ИПМ им М.В. Келдыша РАН, где собраны элементы орбит космических объектов геостационарной области, объект 90073 появился в 2007 году. Тогда же сотрудниками Баллистического центра ИПМ РАН было установлено, что этот объект является фрагментом космического аппарата Fengyun 2D (номер 29640 в каталоге NORAD, международный номер 2006-053A). Аппарат был изготовлен в Китайской народной республике и выведен на геостационарную орбиту в декабре 2006 года в точку стояния  $86.5^\circ$  в.д.

На Рис. 4.1-4.2 представлены графики изменения элементов орбиты КА 29640 Fengyun 2D. Графики построены на основе данных NORAD. Интересно, что географическая долгота подспутниковой точки варьируется в пределах одного градуса. Такой режим полёта достигается коррекцией большой полуоси орбиты. Коррекция осуществляется один раз в два

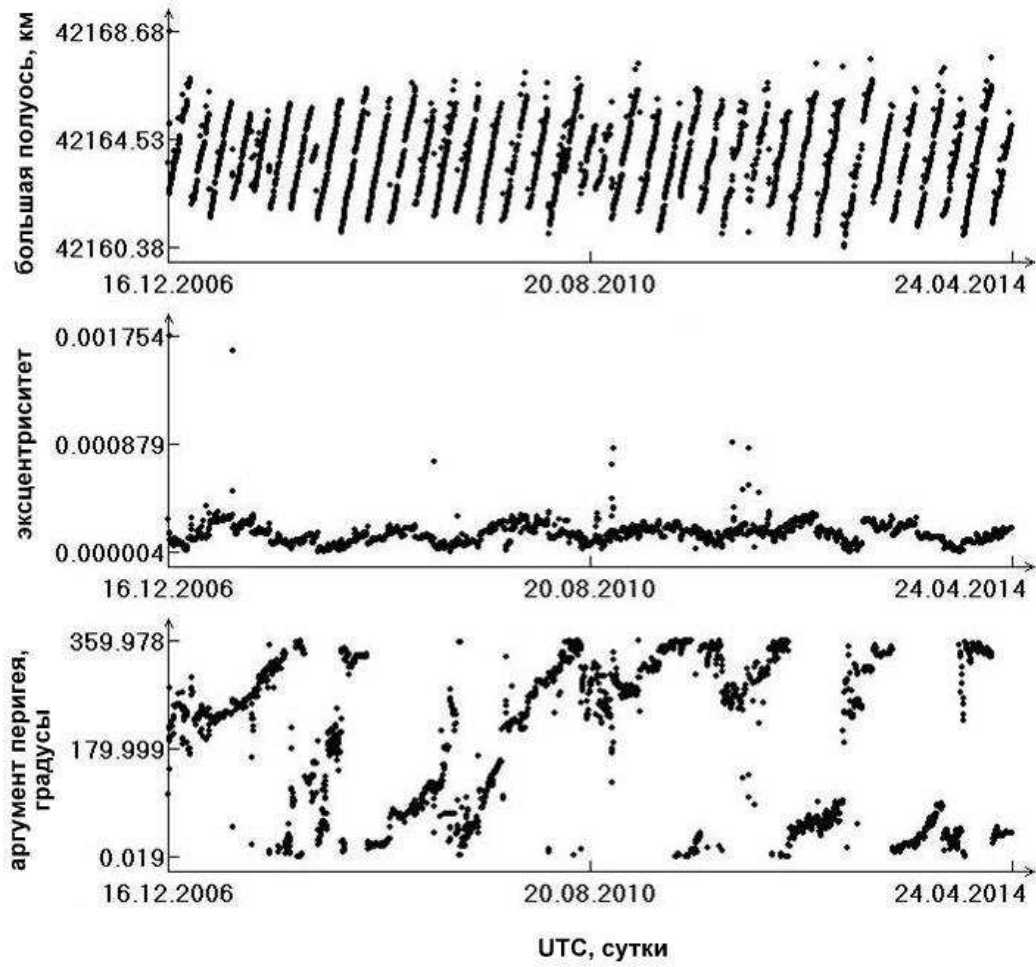


Рис. 4.1. Fengyun 2D, изменение элементов орбиты ( $a$ ,  $e$ ,  $\omega$ ).

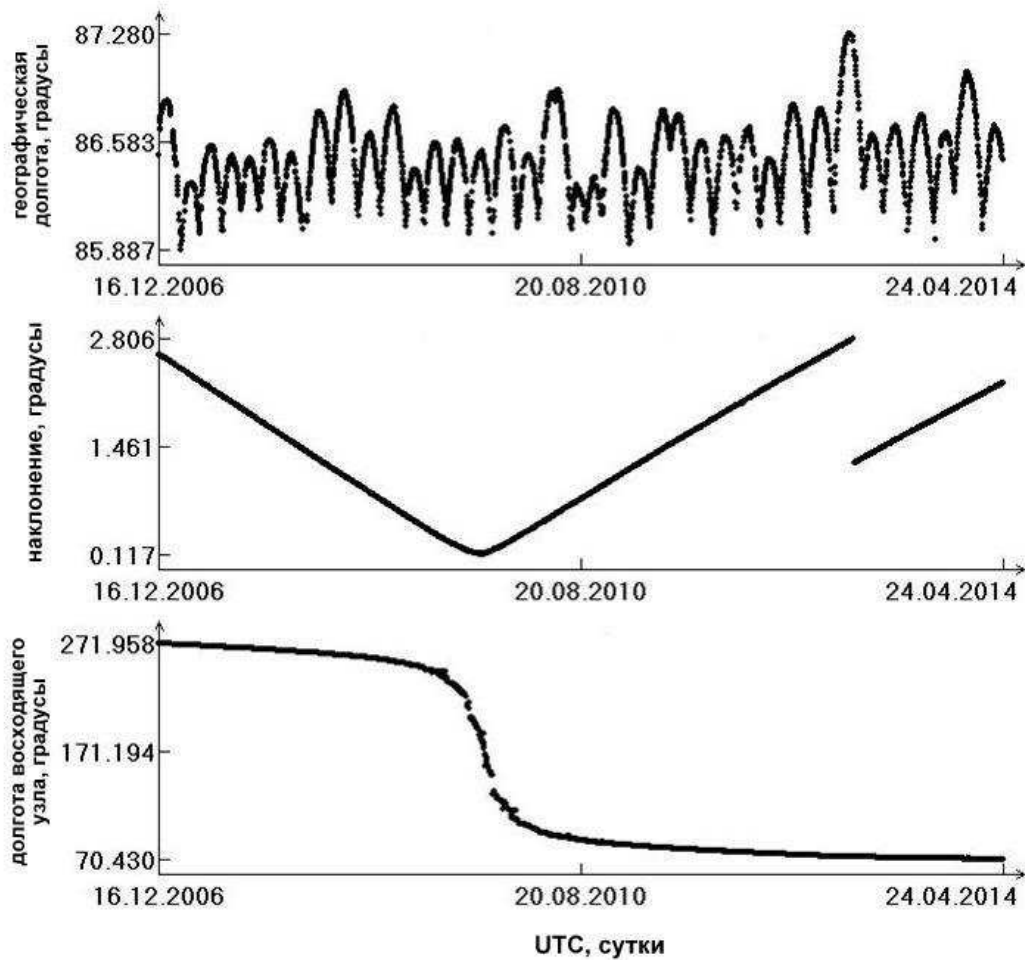


Рис. 4.2. Fengyun 2D, изменение элементов орбиты ( $L$ ,  $i$ ,  $\Omega$ ).

месяца. Через шесть лет работы аппарата в 2012 г. была выполнена первая коррекция угла наклона орбиты, что отражено на соответствующем графике Рис. 4.2.

Фрагмент космического мусора 90073 появился в каталоге NORAD с именем Fengyun 2D Deb и номером 33458 0605304 в конце 2008 года, через год после открытия его средствами российской СККП. Анализ массива параметров движения из динамической базы данных NORAD показал, что этот объект находится в режиме либрации относительно точки  $75.2^\circ$  в.д. с амплитудой  $17.4^\circ$  и периодом либрации 748 суток. Можно сразу отметить, что прогноз положений объекта, вычисленный на основе элементов орбиты по нашим позиционным наблюдениям, подтвердил факт либрации с указанными значениями амплитуды и периода.

Таблица 4.1. Наблюдательный материал и результаты обработки.

Дата сессии	$T$	$n$	$N$	$\sigma$ (")	Блеск m	$A/m$ ( $\text{m}^2/\text{кг}$ )	$e$	$i$ ( $^\circ$ )	$L$ ( $^\circ$ )
02.06.2009	11	6	187	0.66	18.4	0.077	0.00352	0.337	78.0
21.10.2009	7	4	119	0.98	16.6	0.177	0.00633	0.148	66.0
01.03.2010	1	1	23	0.45	17.3	0.050	0.00653	0.422	66.0
26.05.2010	1	2	24	0.26	17.7	0.090	0.00505	0.583	73.0
22.05.2012	11	4	105	0.59	17.8	0.117	0.00722	2.289	69.0
04.09.2012	7	5	97	1.35	18.1	0.041	0.00666	2.537	80.09
04.06.2013	10	8	325	0.48	17.9	0.106	0.00758	3.123	79.0
11.12.2013	8	6	329	0.66	17.2	0.149	0.00822	3.526	64.0
25.03.2014	10	5	142	1.93	17.3	0.174	0.00896	3.730	64.0
24.06.2014	11	7	237	0.48	17.8	0.100	0.00760	3.934	70.0
28.08.2014	10	8	239	1.61	17.6	0.149	0.00709	4.054	78.0
08.11.2014	5	5	507	1.22	18.1	0.041	0.00758	4.174	84.0

Для анализа были использованы измеренные нами топоцентрические положения и блеск объекта 90073 за двенадцать сессий с 2009 по 2014 годы. Основные данные наблюдений и результаты дифференциального улучшения параметров движения представлены в Табл. 4.1. Символом  $T$  обозначен интервал наблюдений в сутках,  $n$  — количество вечеров наблюдений,  $N$  — общее число положений и оценок блеска объекта.

В колонке  $\sigma$  содержатся значения средних квадратических погрешностей одного измерения в секундах дуги. В графе "блеск" приводится среднее арифметическое значение измеренной интегральной звёздной величины объекта для всех наблюдений данной сессии. При вычислении среднего значения эффект фазы не учитывался, так как форма поверхности объекта неизвестна. При работе с наблюдательными данными каждой сессии значение параметра  $A/m$  принималось постоянным. Оценки значения отношения  $A/m$  в случаях, когда количество наблюдательных ночей  $n$  меньше

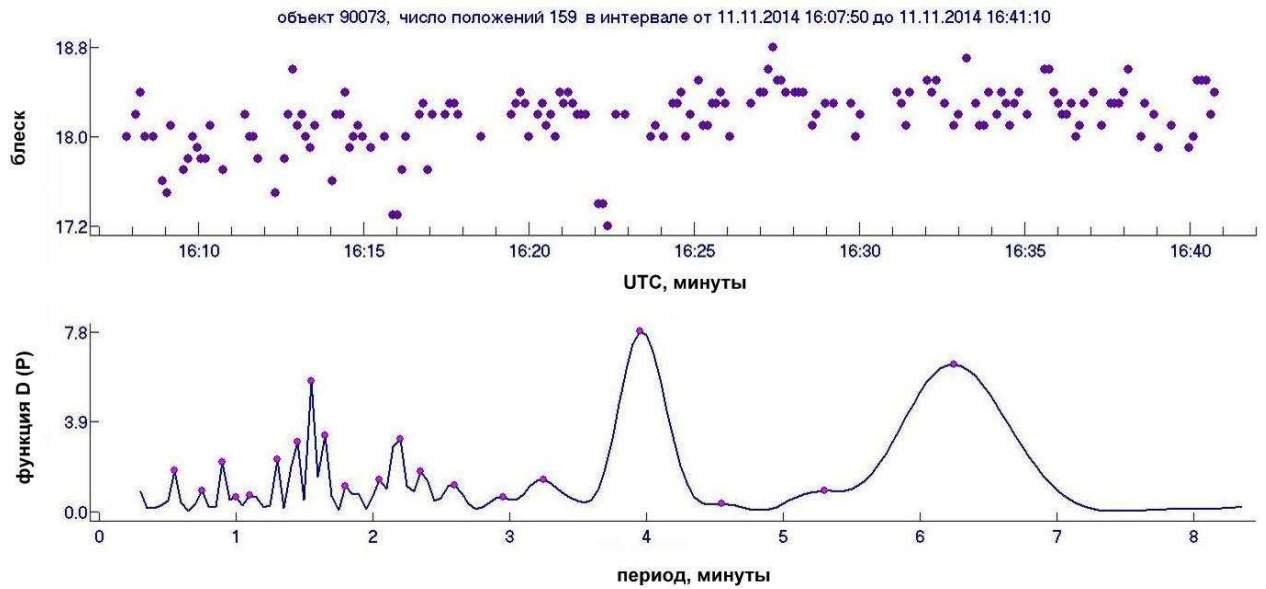


Рис. 4.3. Оценка периода изменения блеска объекта 90073.

трёх, являются ненадёжными. В восьмой и девятой колонках даны, соответственно, значения эксцентриситета и угла наклона орбиты в градусах на эпоху наблюдений. В колонке  $L$  приводятся средние за сессию значения восточной долготы в градусах в момент пересечения экватора.

На основе двух специальных рядов измерений блеска, выполненных в ноябре 2014 г., была получена предварительная оценка периода собственного вращения объекта (см. Рис. 4.3). Продолжительность каждого ряда наблюдений была равна двадцати минутам, частота измерений от пяти до восьми значений за минуту. Предварительная оценка периода вращения составила  $4.0 \pm 0.5$  минуты.

### 4.3. Эволюция эксцентриситета орбиты объекта

Данные Таблицы 4.1 показывают, в первую очередь, переменность оценки величины  $A/m$  и отрицательную корреляцию между этой величиной и средними значениями блеска объекта. Этот факт подтверждает достоверность полученных результатов: объект тем ярче, чем больше оценка средней площади миделева сечения.

Во-вторых, даже наименьшее значение оценки величины  $A/m$ , равное

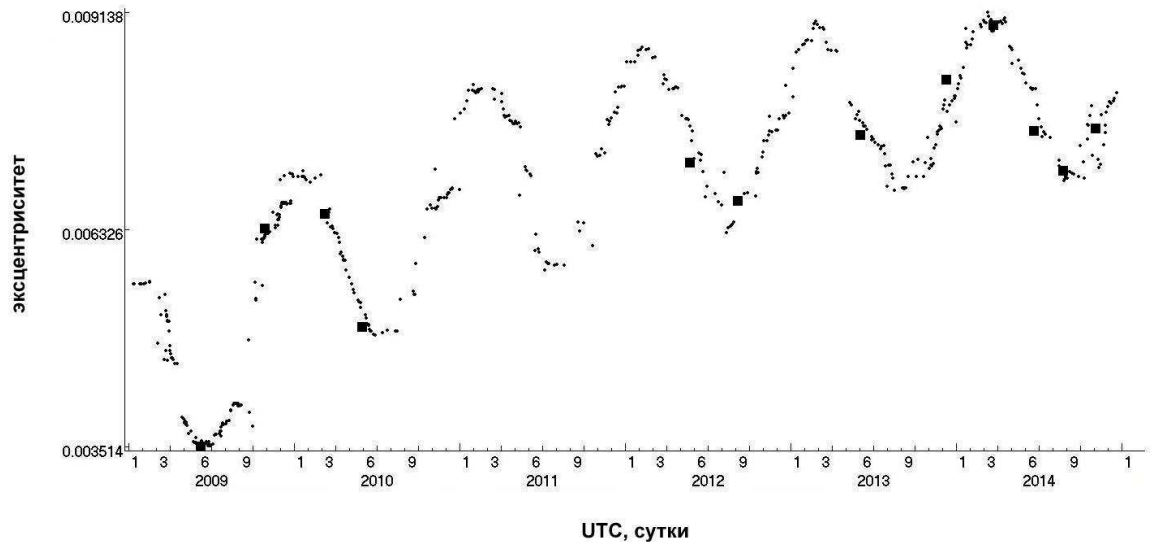


Рис. 4.4. Эволюция эксцентриситета орбиты объекта 90073.

$0.04 \text{ м}^2/\text{кг}$  (см. Табл. 4.1), превышает значение  $0.02 \text{ м}^2/\text{кг}$  [42], максимальное для функционирующих космических аппаратов.

Третий аспект наиболее важен для дальнейшего анализа: значение эксцентриситета орбиты в среднем возрастает. Иллюстрация этого факта представлена на Рис. 4.4. График эволюции эксцентриситета орбиты включает данные NORAD (точки) и результаты обработки наших наблюдений (квадраты). Каждый квадрат, обозначающий данные наших наблюдений, содержит в себе значения эксцентриситета, полученные в течение одной сессии наблюдений, содержащей измерения в течение 5-12 ночей. Период вариаций эксцентриситета изменяется около величины, немного превышающей один год.

Для вычисления влияния долгопериодических возмущений на движение объекта космического мусора мы воспользовались аналитическими формулами Е.П. Аксёнова, приведёнными в монографии [1]. В результате вычислений были сделаны следующие выводы:

- на исследуемом интервале времени возмущающее действие Луны и Солнца приводит к уменьшению значения эксцентриситета орбиты на величину, равную приблизительно  $0.0005$  за год, по формуле 7.6.4



(с. 223), для долгопериодических возмущений второго класса, обусловленных притяжением Луны и Солнца. Формула для возмущений в значении эксцентриситета  $\delta e$  содержит произведение  $e_0\sqrt{1-e_0^2}$  и сумму членов ряда разложения  $\Omega$  по степеням коэффициента  $h$  (см. Табл. 14, с. 215 монографии);

- на геосинхронных орбитах для объектов с большой парусностью, то есть при численных значениях  $A/m > 0.05 \text{ м}^2/\text{кг}$ , световое давление является существенным возмущающим фактором в эволюции эксцентриситета;
- при постоянном значении отношения  $A/m$  эксцентриситет орбиты изменяется с почти годовым периодом и постоянной амплитудой. Вывод сделан по формуле 9.3.3 на с. 289 монографии, для долгопериодических возмущений, обусловленных световым давлением.

В монографии [14] на стр. 41 даны оценки возмущений в эксцентриситете орбиты геостационарных спутников, обусловленные притяжением Луны и действием солнечной радиации. Оценка амплитуды долгопериодических возмущений от Луны составляет 0.000269. Для отношения площади миделева сечения к массе, равной  $0.015 \text{ м}^2/\text{кг}$ , получена оценка амплитуды годовых изменений эксцентриситета порядка 0.00015. В нашем случае, как будет показано далее, величина изменения эксцентриситета на порядок больше.

На Рис. 4.5 и Рис. 4.6 [18] представлены графики эволюции элементов орбиты объекта 90073 с июня 2009 г. по октябрь 2012 г., построенные в 2012 году на основе наблюдений майского сеанса 2009 года и октября 2012 года с помощью численно-аналитической модели движения спутников с учётом действия всех возмущающих факторов [8].

На графиках даны результаты прогноза, выполненного в обратном направлении с начальными данными за сентябрь 2012 г. и постоянным зна-

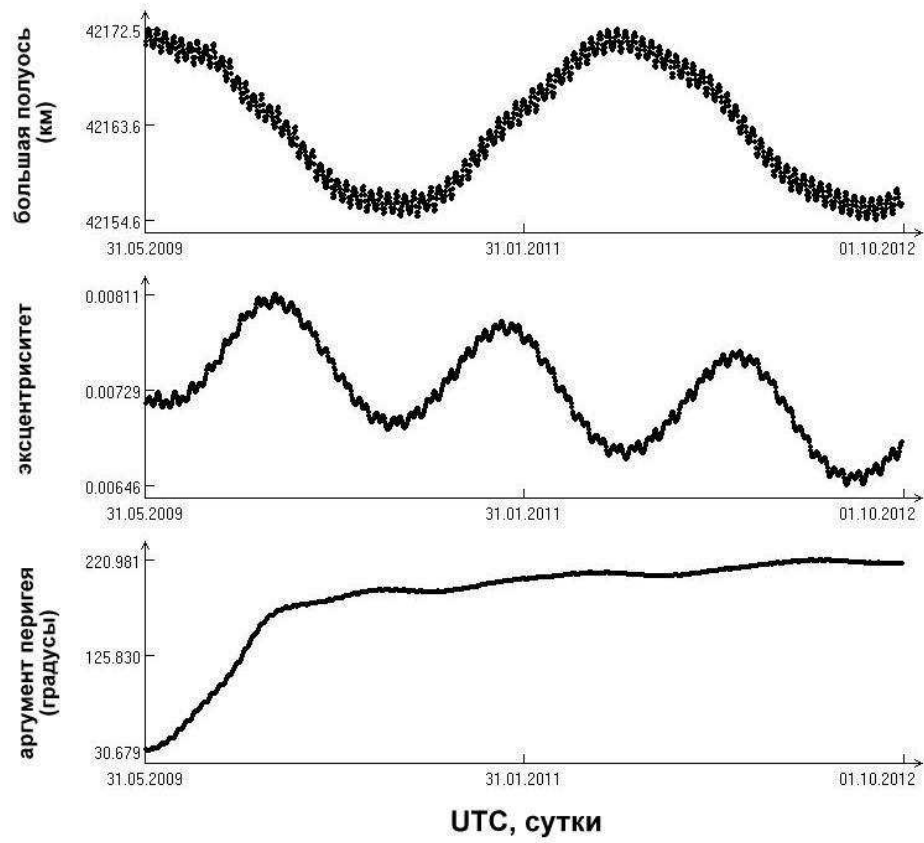


Рис. 4.5. Изменение элементов орбиты ( $a$ ,  $e$ ,  $\omega$ ) объекта 90073 по результатам прогноза эволюции на 2012 год.

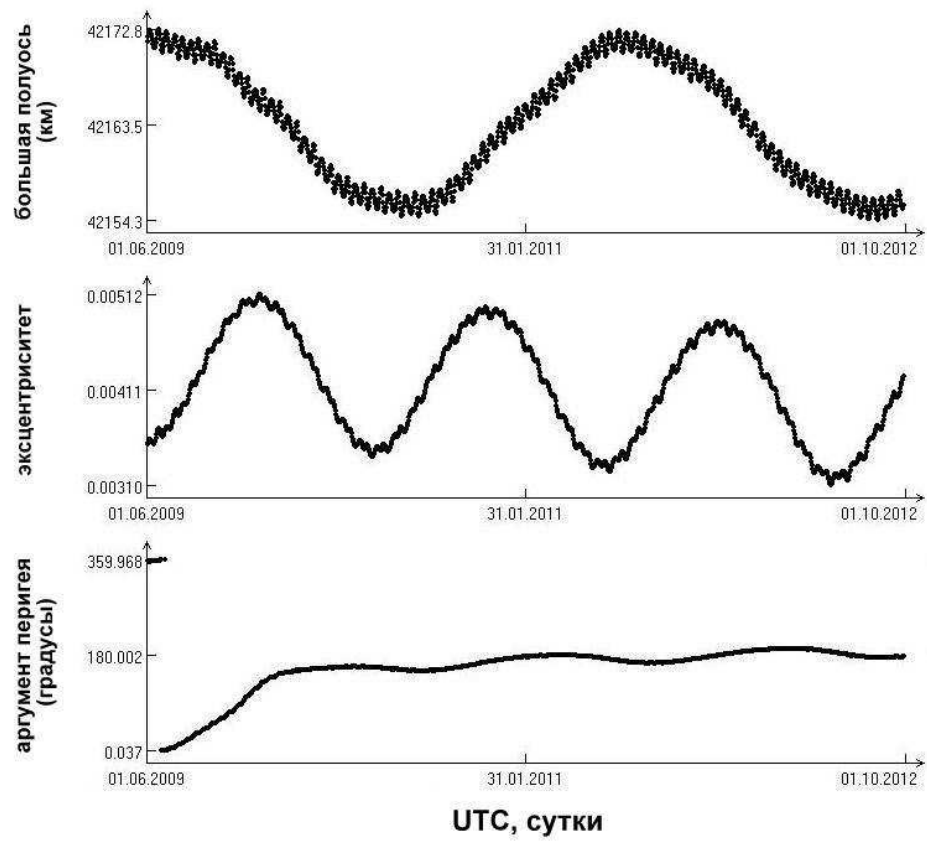


Рис. 4.6. Изменение элементов орбиты ( $a$ ,  $e$ ,  $\omega$ ) объекта 90073 по результатам прогноза эволюции на 2009 год.

чением отношения  $A/m = 0.041$ , а также приведены результаты прогноза с начальными данными за июнь 2009 г. и величиной  $A/m = 0.077$  (см. Табл. 4.1 настоящей главы). Оценка амплитуды вариаций эксцентриситета орбиты с периодом, равным одному году, для значения  $A/m = 0.041$  составила 0.00049, а для величины  $A/m = 0.077$  оказалась приблизительно равной 0.00092.

Из Табл. 4.1 настоящей главы следует, что только между двумя сессиями 2009 г. значение эксцентриситета орбиты увеличилось на 0.0028. Такое большое изменение указывает на действие светового давления. Неравенства в величине эксцентриситета орбиты, обусловленные суммарным влиянием Луны и Солнца, существенно меньше [14].

На базе этих выводов наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта на Рис. 4.4 и в Табл. 4.1 получает простое объяснение. Видно, что на восходящей ветви графика среднее значение отношения  $A/m$  больше, чем на нисходящей ветви. Таким образом, на восходящей ветви световое давление приводит к увеличению значения эксцентриситета, уменьшение этой величины на нисходящей ветви не может компенсировать полученное приращение.

#### **4.4. Модель вариаций отношения площади миделева сечения к массе объекта**

Сравнительный анализ долгопериодических изменений численных значений  $A/m$  объекта 90073 позволяет выделить период, равный 392 суткам. Последние пять сессий наблюдений, проведенные за 11 месяцев, показали, что на интервале одного периода существует два максимума и два минимума (см. Рис. 4.7). Оба максимума и оба минимума отличны друг от друга по величине. Этих данных оказалось достаточно, чтобы поставить задачу построения модели изменения параметра на всем интервале измерений.

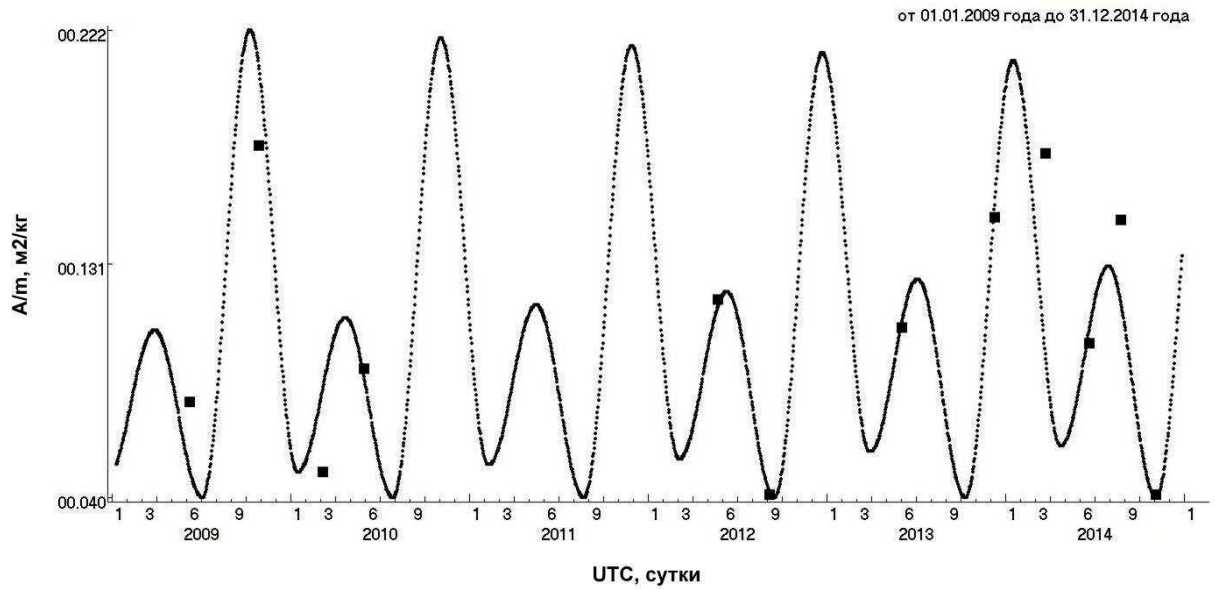


Рис. 4.7. Модель вариаций величины отношения  $A/m$  для объекта 90073.

Было сделано важное упрощающее предположение: вариации отношения площади миделева сечения к массе объекта можно аппроксимировать гладкой функцией. Модель вариаций численных значений параметра  $A/m$  представлена точками на Рис. 4.7. Квадратами на графике отмечены величины, полученные в результате обработки наблюдений отдельных сессий.

На интервале одного периода, равного 392 дням, модель была составлена из четырех кривых. Каждая кривая является частью синусоиды, имеющей период 196 суток. В модели использованы две восходящие ветви двух синусоид, от минимума к максимуму, и две нисходящие ветви двух синусоид, от максимума к минимуму. Минимальные и максимальные значения были найдены в результате последовательных приближений. Одно приближение включало в себя конкретные параметры модели и прогноз параметров движения объекта на всем исследуемом интервале. Выбор параметров модели был завершён после выполнения двух условий: когда были достигнуты качественное соответствие прогнозируемых параметров движения данным NORAD и количественное соответствие результатам обработки измеренных топоцентрических положений. На интервале сравнения

Таблица 4.2. Параметры модели вариаций величины отношения  $A/m$  для объекта 90073.

Параметры	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$u_i$ , дни	56577	56675	56773	56871
$v_i$ , дни	56675	56773	56871	56969
$t_i$ , дни	56626	56724	56822	56920
$a_i$ , м <sup>2</sup> /кг	0.125	0.130	0.080	0.075
$\dot{a}_i$ , м <sup>2</sup> /кг	-0.0015	0.0002	0.004	0.0025
$A_i$ , м <sup>2</sup> /кг	0.085	-0.080	0.030	-0.035
$\dot{A}_i$ , м <sup>2</sup> /кг	-0.0015	0.003	0.0015	-0.025

максимальные отклонения по прямому восхождению для каждой сессии не превышали величины  $|\Delta\sigma_{max}| \approx 2200''$ .

В Таблице 4.2 представлены параметры модели на интервале времени от 12.10.2013 до 08.11.2014 (от 56577 до 56969 в модифицированных юлианских днях). Общий интервал продолжительностью 392 дня разделён на четыре интервала по 98 дней. Величины  $u_i$  и  $v_i$  соответствуют началу и концу короткого интервала. Величина  $t_i$  соответствует середине интервала,  $a_i$  - приближённое значение параметра  $A/m$  в момент  $t_i$ ,  $A_i$  - амплитуда восходящей или нисходящей ветви синусоиды.

В результате для вычисления параметра  $A/m$  на интервале одного периода, равного 392 суткам, получена следующая аппроксимирующая формула:

$$\frac{A}{m} = a_i + A_i \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t - t_i}{v_i - u_i}\right). \quad (4.1)$$

Для другого большого интервала времени к значениям  $u_i$ ,  $v_i$  и  $t_i$  надо добавить или от этих значений отнять число, кратное 392 суткам. Параметры  $a_i$  и  $A_i$  на другом интервале вычисляются с помощью величин  $\dot{a}_i$  и  $\dot{A}_i$  (Таблица 4.2). Например, интервал 55489 – 55885 в модифицированных юлианских днях отстоит от основного интервала на три периода назад по

времени, в этом случае  $a_i^{-3} = a_i - 3 \cdot 396 \cdot \dot{a}_i$  и  $A_i^{-3} = A_i - 3 \cdot 396 \cdot \dot{A}_i$ .

#### 4.5. Вращательное движение и оценка точности модели

Предлагаемая модель периодических вариаций величины  $A/m$  проясняет детали вращательного движения объекта 90073. График на Рис. 4.7 и предварительную оценку периода вращения объекта, составившую  $4.0 \pm 0.5$  минуты (Рис. 4.3), можно интерпретировать следующим образом. Малоразмерный объект неправильной формы вращается вокруг оси с наибольшим моментом инерции и совершает около 350 оборотов за сутки. В результате сохраняется ориентация объекта в пространстве. Минимальные значения величины отношения  $A/m$  соответствуют таким положениям объекта, когда Солнце освещает меньшую часть поверхности. Далее угол между осью вращения, сохраняющей свою ориентацию в пространстве, и направлением на Солнце изменяется вследствие обращения Земли. Солнце освещает другие части поверхности спутника, площадь освещаемой поверхности возрастает, достигает наибольшего значения и начинает убывать.

Основной период модели не совпадает с периодом обращения Земли по причине прецессии оси вращения. Это явление приводит к двум эффектам: основной период вариаций величины отношения  $A/m$  превышает один год, и амплитуда колебаний испытывает долгопериодические изменения. Для однозначного определения параметров прецессии необходимы дополнительные наблюдения.

В этом контексте модель вариаций параметра  $A/m$  можно считать эмпирической моделью вращательного движения объекта. Без учёта вариаций  $A/m$  прогноз поступательного движения на интервале наблюдений приводит к большим отклонениям по положению. Это отражено на Рис. 4.8–4.9, на которых приведён прогноз изменения элементов орбиты объекта 90073 до конца 2015 г.: при постоянном значении  $A/m = 0.09 \text{ м}^2/\text{кг}$  величина эксцентриситета убывает.

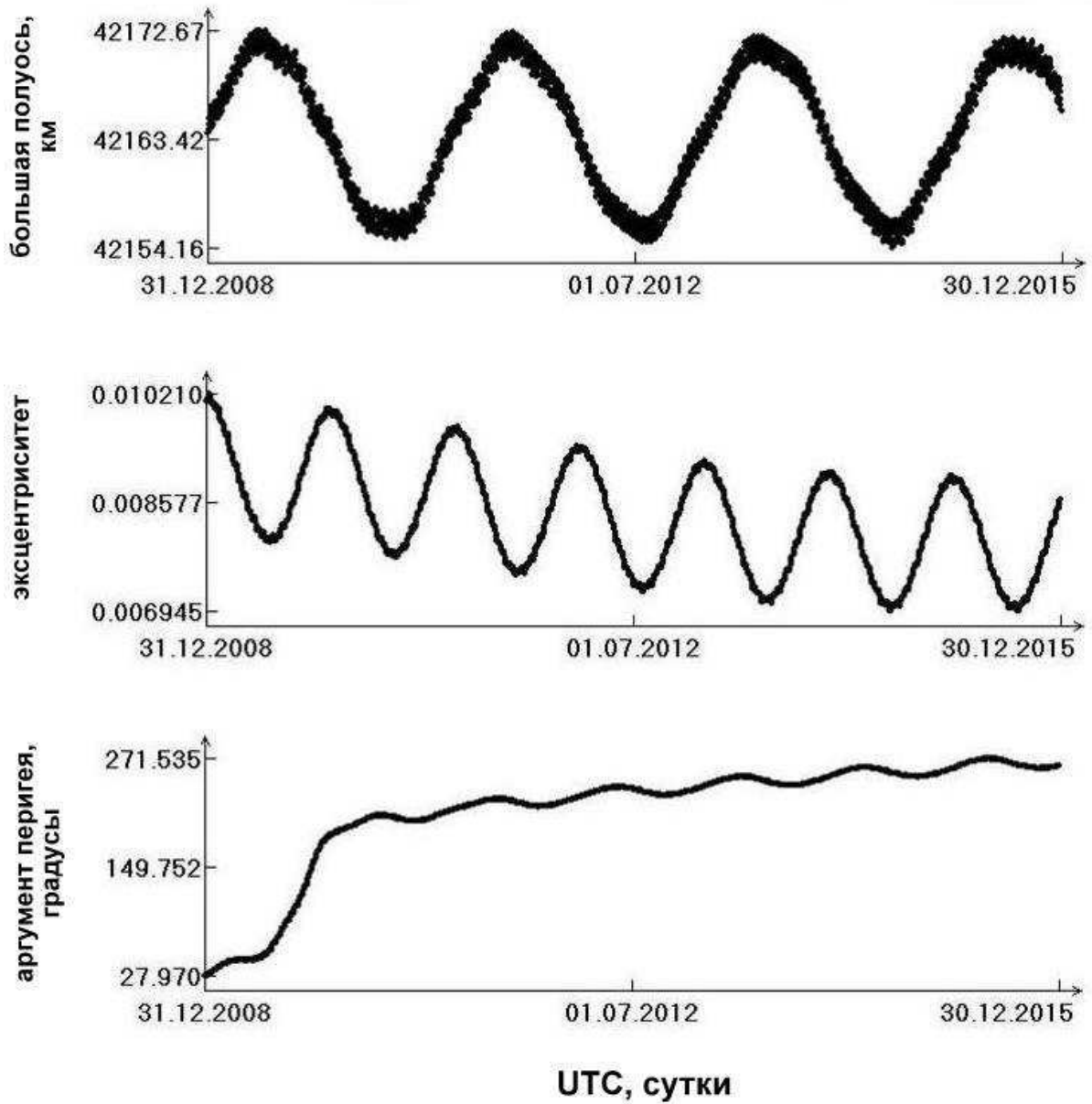


Рис. 4.8. Прогноз изменения элементов орбиты ( $a$ ,  $e$ ,  $\omega$ ) объекта 90073 при постоянном  $A/m$ .



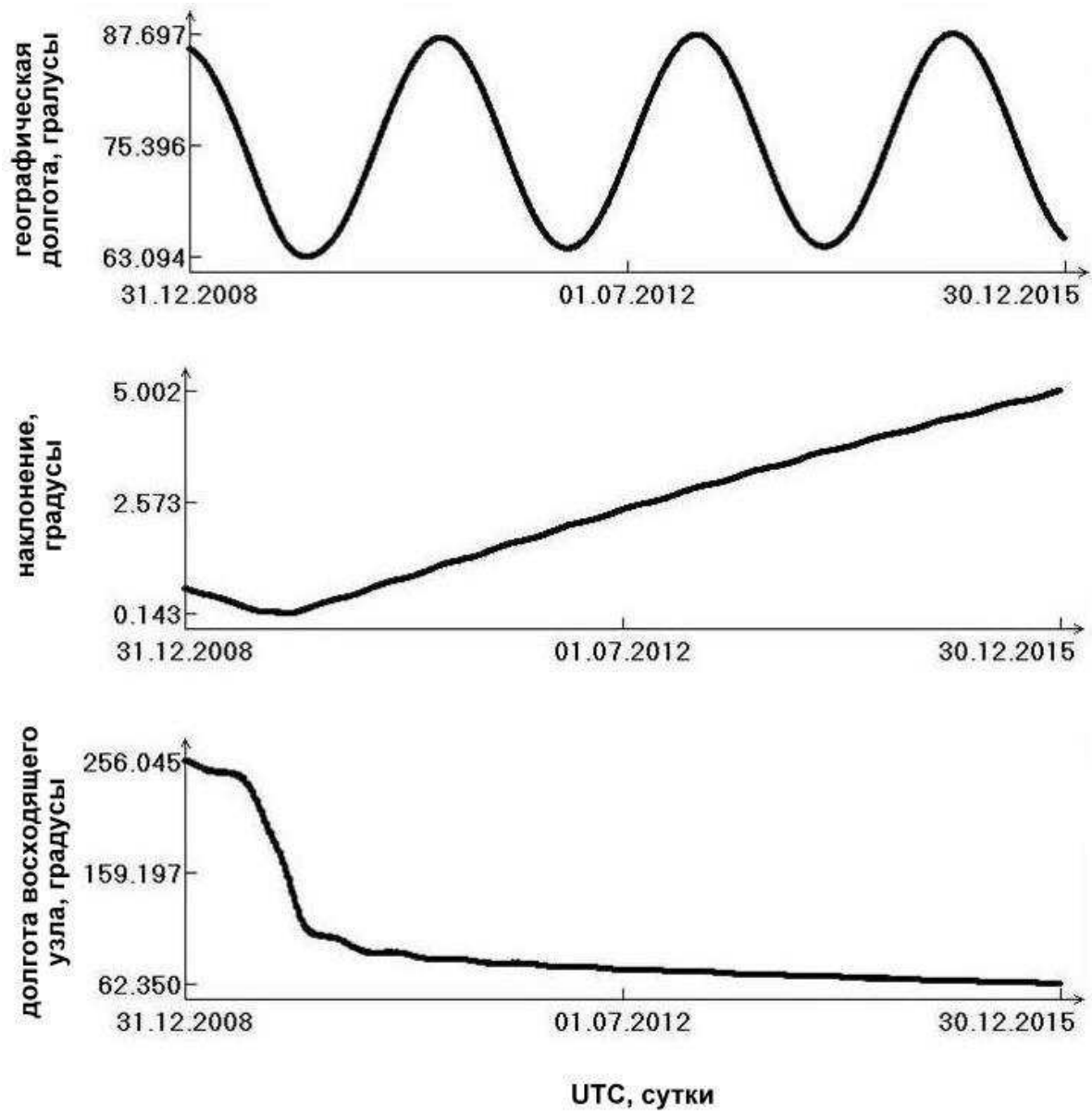


Рис. 4.9. Прогноз изменения элементов орбиты ( $L$ ,  $i$ ,  $\Omega$ ) объекта 90073 при постоянном  $A/m$ .

Таблица 4.3. Контрольный наблюдательный материал.

Дата сессии	$T$	$n$	$N$	$\sigma$ (")	Блеск m	$A/m$ ( $m^2/kg$ )	$e$	$i$ ( $^\circ$ )	$L$ ( $^\circ$ )
09.03.2015	5	3	578	1.06	16.7	0.180	0.00907	4.423	86.2
Прогноз	5	3	578	1300.0	16.7	0.187	0.00889	4.422	86.7

В начале марта 2015 г. в обсерватории на пике Терскол нами был получен контрольный ряд наблюдений исследуемого объекта. Материал использован для оценки точности предлагаемой модели, результаты обработки представлены в Табл. 4.3. Обозначения те же, что и в Табл. 4.1.

Данные первой строки Табл. 4.3 относятся к новой сессии измерений и получены при тех же условиях и ограничениях, что и данные Табл. 4.1 для каждой из предыдущих наблюдательных сессий. Во второй строке Табл. 4.3 даны результаты прогноза движения объекта. При прогнозе были использованы предлагаемая модель вариаций отношения площади миделева сечения к массе объекта и начальные параметры поступательного движения, полученные на основе всей совокупности предыдущих наблюдений. В графе  $\sigma$  значение  $|\Delta\alpha_{max}| \approx 1300.0''$  характеризует абсолютную величину максимальных отклонений по прямому восхождению измеренных положений от прогнозируемых значений. Прогноз параметра  $A/m$  отличается от вычисленной оценки этой величины приблизительно на 4%.

Контрольный массив включает в себя 578 измерений положений за три ночи наблюдений, в том числе и 168 измерений блеска объекта в течение 20 минут. Оценка периода вращения объекта, полученная на этом материале, совпадает с предварительной оценкой.

В 2015 году нами были осуществлены новые наблюдения объекта 90073. На Рис. 4.10 приведены данные измерения блеска на большом интервале наблюдений (12 ночей) в июле 2015 г. На верхнем графике приведены оценки блеска: по оси абсцисс отложено время в сутках, по оси ординат

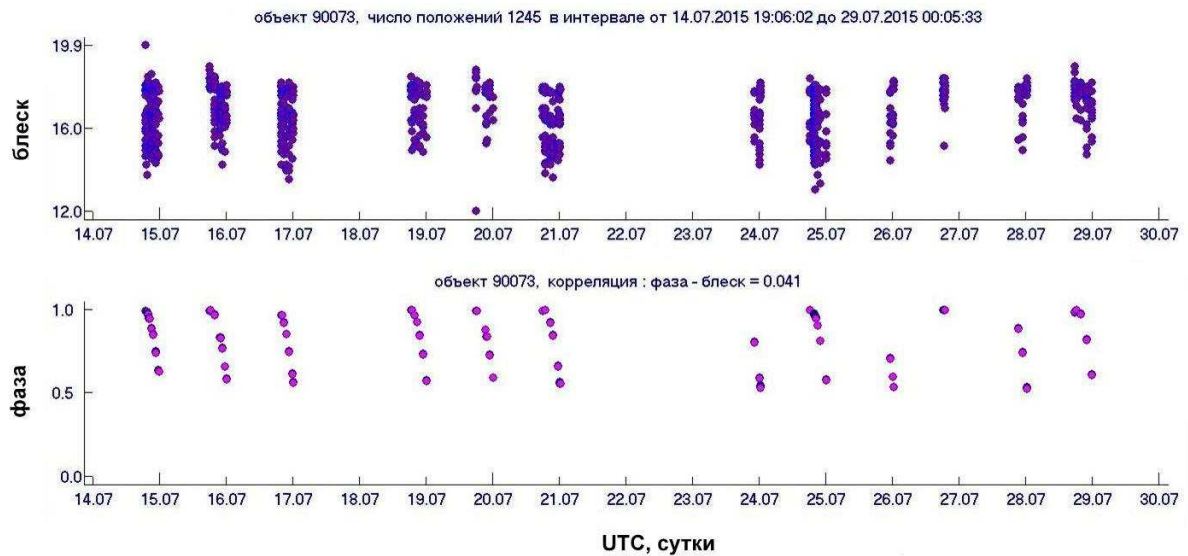


Рис. 4.10. Изменение блеска объекта 90073 на большом интервале времени.

- интегральная звёздная величина объекта. На нижнем графике Рисунка 4.10 показаны фазовые кривые наблюдений объекта 90073: по оси абсцисс отложено время в сутках, по оси ординат - значения фазы. Необходимо отметить, что наблюдения данного объекта скорректированы за фазу, т.е. осуществлены при разных фазовых углах в течение нескольких часов за ночь.

На Рис. 4.11 на график наблюдательных значений эксцентриситета нанесены последние данные наблюдений 2015 года.

На Рис. 4.12 представлен обновлённый график модели вариаций величины отношения  $A/m$  для объекта 90073. Модель получена на основе 12 сессий наблюдений, проведённых с июня 2009 г. по ноябрь 2014 г. Добавлены данные обработки трёх наблюдательных сеансов в 2015 году. По оси абсцисс отложено время наблюдений в годах, по оси ординат - значения  $A/m$  в  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

На Рис. 4.13 приведено сравнение модели вариаций величины отношения  $A/m$  объекта 90073 со всеми имеющимися наблюдательными данными: с октября 2007 г. по июль 2015 г. 17 сессий наблюдений нанесены на график. Нужно отметить, что в 2007-2008 гг. наблюдения проводились на другой аппаратуре комплекса телескопа Zeiss-2000.



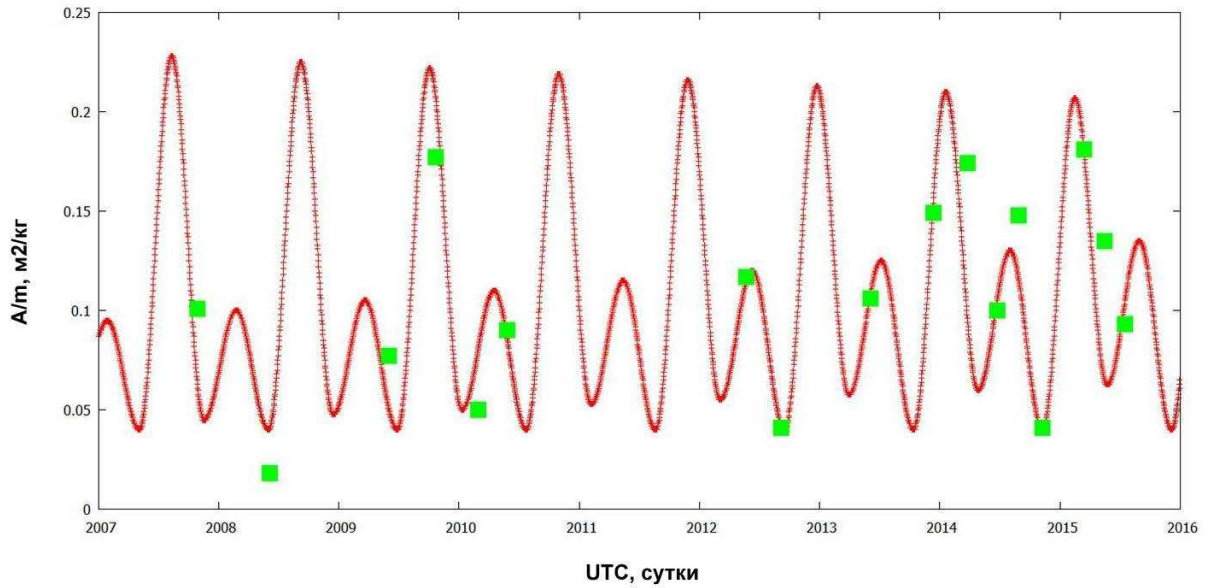


Рис. 4.13. Сравнение модели вариаций  $A/m$  объекта 90073 с наблюдательными данными 2007-2015 гг.

Предложенная модель позволяет сделать вывод о том, что исследуемый объект относится к классу быстро вращающихся фрагментов космического мусора на геосинхронной орбите. Для определения параметров вращения необходимы как проведение новых наблюдений, так и моделирование вращательного движения объекта неправильной формы в гравитационном поле Земли с учетом светового давления.

**По результатам Главы 4 на защиту выносятся следующие положения:**

Исследовано поступательно-вращательное движение объекта космического мусора с большим отношением площади миделева сечения к массе, измерения координат и оценок блеска которого были получены в течение шести лет наблюдений на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории.

Установлен наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта, обусловленный влиянием светового давления. Показано, что для долговременного прогноза орбиты необходимы регулярные наблюдения для уточнения величины эксцентриситета.

Сделан вывод о вариативности величины отношения площади миде-лева сечения для объекта сложной формы на высокой орбите. Построена модель изменения величины ОПМ, на основе которой были выявлены особенности вращательного движения объекта. С учётом новых данных была уточнена используемая численно-аналитическая модель движения ИСЗ и космического мусора.

Показано, что учёт изменения величины отношения площади миде-лева сечения к массе позволяет более точно прогнозировать параметры орбиты объекта.

## Заключение

Изучение особенностей движения малоразмерных объектов космического мусора на высоких орбитах является актуальной задачей, позволяющей уточнять имеющиеся данные о поведении искусственных тел в гравитационном поле Земли под влиянием различных возмущений.

В диссертации изучена долговременная эволюция объектов космического мусора по данным длинного ряда однородных высокоточных оптических наблюдений. Показано, что для объектов с большой величиной отношения площади миделева сечения к массе для уточнения параметров орбиты необходимы прежде всего регулярные новые наблюдения. Объекты сложной формы с переменной площадью отражающей поверхности подвержены влиянию негравитационных эффектов, которые не всегда могут быть промоделированы численными методами на большие отрезки времени.

Показано, что последствия разрушений в космосе, случившиеся несколько десятков лет назад, не каталогизированы в полной мере. В настоящее время с развитием аппаратуры и методик наблюдений космического мусора продолжают обнаруживаться малоразмерные обломки аппаратов, образовавшиеся в геостационарной области после взрывов, произошедших в прошлом веке. Согласно данным обнаружения таких фрагментов, актуальной научной и прикладной задачей становится дальнейшее сопровождение этих объектов и мониторинг всех областей их скопления для обнаружения вероятных новых объектов и изучения движения в ОКП уже известных последствий разрушения аппаратов.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Рыхловой Лидии Васильевне; Бахтигараеву Наилу Сагитовичу и Чазову Вадиму Викторовичу - за бесценное сотрудничество и помощь; всем сотрудникам обсерватории на пике Терскол и лично Сергееву Александру Васильевичу - за помощь в организации наблюдений и ценные советы; Куприянову Владимиру Викторовичу - за помощь в работе с программным обеспечением.



## Список сокращений и условных обозначений

ВАУ - Высокоточная астрономическая установка

ВЭО - высокоэллиптическая орбита

ГАО РАН - Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

ГСО - геостационарная орбита

ГСС - геостационарный спутник

ДЗЗ - дистанционное зондирование Земли

ИНАСАН - Институт астрономии Российской академии наук

ИПМ РАН - Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук

ИСЗ - искусственный спутник Земли

КА - космический аппарат

КМ - космический мусор

КО - космический объект

МККМ - Межагентский координационный комитет по космическому мусору (*англ.* IADC - The Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)

МКС - Международная Космическая Станция

НОО - низкая околоземная орбита

ОЗ - орбита захоронения

ОКП - околоземное космическое пространство

ООН - Организация Объединённых Наций

ОПМ - отношение площади миделева сечения к массе

ПЗС - прибор зарядовой связи

РАН - Российская академия наук

РЛС - радиолокационная станция

РН - ракета-носитель

СВО - средневысотная орбита

СККП - система контроля космического пространства

СКО - среднее квадратическое отклонение

ССО - солнечно-синхронная орбита

ТФ ИНАСАН - Терскольский филиал Института астрономии РАН

FITS - гибкая система передачи изображений (*англ.* Flexible Image Transport System)

NASA - Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (*англ.* National Aeronautics and Space Administration)

NORAD - Командование воздушно-космической обороны Северной Америки (*англ.* North American Aerospace Defense Command)

UTC - Всемирное координированное время (*англ.* Coordinated Universal Time)

## Литература

1. Аксенов, Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли. — М.: Наука, 1977. — 360 с.
2. Аксенов, О. Ю. Возможности радиолокационных средств системы предупреждения о ракетном нападении по обнаружению космических объектов / О. Ю. Аксенов, С. С. Вениаминов, С. В. Якубовский // Околосземная астрономия 2015 / под ред. Л. В. Рыхловой [и др.]. — М., 2016. — С. 261–265.
3. Андреев М. В. Исследования малоразмерных геостационарных объектов в обсерватории на пике Терскол в 2006 - 2007 годах / М. В. Андреев, Н. С. Бахтигараев, А. В. Сергеев, Д. Л. Титов // Околосземная астрономия 2007 / под ред. Л. В. Рыхловой [и др.]. — Нальчик, 2008. — С. 331–335.
4. Базей, А. А. Эволюция орбиты пассивного фрагмента с большой площадью поверхности на высокой околоземной орбите / А. А. Базей [и др.] // Математическое моделирование и численные методы, — 2015. — 1(5). — С. 83–93.
5. Бахтигараев, Н. С. Фотографические наблюдения ИНТ и возможности их каталогизации / Н. С. Бахтигараев // Проблема загрязнения космоса (Космический мусор) / под ред. А. Г. Масевич. — М.: Космосинформ, 1993.
6. Бахтигараев, Н. С. Наблюдения высокоэллиптических космических объектов в Звенигородской обсерватории ИНАСАН / Н. С. Бахтига-

- раев, Н. Д. Костюк, В. В. Чазов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. — 2013. — № 4. — С. 38–42.
7. Бахтигараев, Н. С. Наблюдения неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории / Н. С. Бахтигараев [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. — 2011. — Т. 39. — № 6. — С. 186–189.
  8. Бахтигараев, Н. С. Информационное обеспечение космических экспериментов на основе численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли / Н. С. Бахтигараев, В. В. Чазов // Космические исследования. — 2005. — Т. 43. — № 5. — С. 386–389.
  9. Бордовицына, Т. В. Теория движения искусственных спутников Земли, Аналитические и численные методы / Т. В. Бордовицына, В. А. Авдюшев. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. — 220 с.
  10. Вениаминов, С. С. Космический мусор - угроза человечеству / С. С. Вениаминов, А. М. Червонов. — М.: Изд-во ИКИ РАН, 2012. — 192 с.
  11. Девяткин, А. В. Программные пакеты "АПЕКС-I" и "АПЕКС-II" для обработки астрономических ПЗС наблюдений / А. В. Девяткин [и др.] // Астр. вестн. — 2010. — Т. 44. — № 1. — С. 74–87.
  12. Карпов, Н. В. Наблюдение событий в околоземном пространстве на пике Терскол, 1997 - 2007 гг. / Н. В. Карпов, А. В. Сергеев, В. К. Тарадий // Околоземная астрономия 2007 / под. ред. Л. В. Рыхловой [и др.]. — Нальчик 2008. — С. 299–305.
  13. Касименко, Т. В. Взрывы на геостационарной орбите / Т. В. Касименко, А. М. Микиша, Л. В. Рыхлова, М. А. Смирнов // Столкновения в околоземном пространстве (Космический мусор) / под ред. А. Г. Масевич. — М.: Космосинформ, 1995. — С. 159–168.

14. Киладзе, Р. И. Теория движения геостационарных спутников / Р. И. Киладзе, А. С. Сочилина. — СПб.: ООО "ВВМ", 2008. — 132 с.
15. Клишин, А. Ф. Анализ техногенной опасности для геостационарных космических аппаратов вблизи точки либрации  $75^\circ$  в.д. / А. Ф. Клишин, В. В. Чазов, Н. С. Бахтигараев, Н. Д. Костюк // Околосземная астрономия 2007. — Нальчик, 2008. — С. 335–340.
16. Космический мусор. В 2 кн. Кн.1. Методы наблюдения и модели космического мусора / Под науч. ред. Г. Г. Райкунова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 248 с.
17. Кузнецов, Э. Д. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов / Э. Д. Кузнецов // Астрономический вестник. — 2011. — Т. 45. — № 5. — С. 444–457.
18. Левкина, П. А. Результаты фотометрических и позиционных наблюдений фрагментов космического мусора в обсерватории на пике Терскол / П. А. Левкина [и др.] // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. — 2013. — № 220. — С. 47–52.
19. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором / под ред. Ю.Н. Макарова. — ЦНИИмаш, 2015. — 244 с.
20. Назаренко, А.И. Моделирование космического мусора / А. И. Назаренко. — М.: ИКИ РАН, 2013. — 216 с.
21. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 52925-2008. "Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства". М.: Стандартиформ, 2008.

22. Поляхова, Е. Н. Космический полёт с солнечным парусом: проблемы и перспективы / Е. Н. Поляхова. — М.: Наука, 1986. — 304 с.
23. Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора, 2007.
24. Русаков, О. П. Устройство для синхронизации наблюдений со службой точного времени GPS на базе модуля "Trimble Resolution T" / О. П. Русаков, В. В. Куприянов // Режим доступа : <http://lfvn.astronomer.ru/report/0000018/GAO/index3.htm> свободный.
25. Санкович, А. В. Светосильные широкоугольные зеркально-линзовые телескопы фирмы "Сантел" / А. В. Санкович, А. Д. Юдин // Международная конференция "АСТРОКАЗАНЬ-2009" / под ред. Л. В. Рыловой [и др.]. — Казань, 2009.
26. Смирнов, М. А. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления / М. А. Смирнов, А. М. Микиша // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1993. — С. 126–142.
27. Смирнов, М. А. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления. Часть II. Определение параметров, характеризующих действие светового давления на геосинхронные спутники, по фотометрическим наблюдениям / М. А. Смирнов, А. М. Микиша // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995. — С. 252–271.
28. Хуторовский, З. Н. Ведение каталога космических объектов / З. Н. Хуторовский // Космические исследования. — 1993. — Т. 31. — Вып. 4.
29. Хуторовский, З. Н. Риск столкновений на низких высотах с учётом

- некаталогизированных объектов / З. Н. Хуторовский // *Околоземная астрономия*. — М., 1998.
30. Чазов, В. В. Основные алгоритмы численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли // В. В. Чазов / *Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга*. — 2000. — Т. 68. — С. 5–22.
31. Чазов, В. В. Разработка и применение алгоритмов численно-аналитического метода вычисления положений искусственных спутников Земли : дис. д-ра физ.-мат. наук : 01.03.01 / В. В. Чазов ; Москва, Гос. астрон. ин-т им. П. К. Штернберга МГУ им М. В. Ломоносова. — М., 2012. — 210 л.
32. Яцкив, Я. С. Астрономия в Приэльбрусье / Я. С. Яцкив, Л. В. Рылова, В. К. Тарадий // *Кинематика и физика небесных тел*. — 2016. — Т. 32. — № 5.
33. Alby, F. Status of CNES optical observations of space debris in geostationary orbit / F. Alby et al. // *Advances in Space Research*. — 2004. — V. 34. — P. 1143–1149.
34. Anselmo, L. Dynamical evolution of high area-to-mass ratio debris released into GPS orbits / L. Anselmo, C. Pardini // *Advances in Space Research*. — 2009. — V. 43. — P. 1491–1508.
35. Batyr, G. The current state of Russian Space Surveillance System and its capability in surveying space debris / G. Batyr et al. // *Proc. of First European Conf. on Space Debris*. — Darmstadt, 1993.
36. Breiter, S. Long-term predictability of orbits around the geosynchronous altitude / S. Breiter, I. Wytrzyszczak, B. Melendo // *Advances in Space Research*. — 2005. — V. 35. — P. 1313–1317.

37. Hanada, T. Theoretical and empirical analysis of the average cross-sectional areas of breakup fragments / T. Hanada, J.-C. Liou // *Advances in Space Research*. — 2011. — V. 47. — P. 1480–1489.
38. Hanada, T. Using Breakup Models and Propagators to Devise Debris Search Strategies in GEO // T. Hanada, M. Matney // *Advances in the Astronautical Sciences*. — 2002. — V. 110. — P. 373–385.
39. Hoots, F. R. Models for Propagation of NORAD Element Sets [Electronic resource] / F. R. Hoots, R. L. Roehrich // *Spacetrack Report № 3*. — 1980 — . — Режим доступа : (<http://celestrak.com/NORAD/documentation/>). — Загл. с экрана.
40. Jenkin, A. Constellation and "Graveyard" Collision Risk for Several MEO Disposal Strategy / A. Jenkin, J. McVey // *Proc. of Fifth European Conf. on Space Debris*. — Darmstadt, 2009.
41. Kamensky, S. Determination of Satellite Origin: Ways to Improve the Catalog / S. Kamensky, Z. Khutorovsky // *Proc. of Second European Conf. on Space Debris*. — Darmstadt, 1997.
42. Kaula, W. M. *Theory of Satellite Geodesy: Applications of Satellites to Geodesy* / W. M. Kaula. — New York : Dover public., Inc., 1966. — 160 p.
43. Kessler, D. J. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt / D. J. Kessler, B. G. Cour-Palais // *Journal of Geophysical research*. — 1978. — V. 83. — № A6.
44. Kessler, D. J. Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth Orbit / D. J. Kessler // *Advances in Space Research*. — 1991. — V. 11. — № 12. — P. 1263–1266.
45. Kiladze, R. I. On evolution of geostationary satellite orbits / R. I. Kiladze,



- A. S. Sochilina // *Advances in Space Research*. — 1997. — V. 19. — № 11. — P. 1685–1688.
46. Kouprianov, V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects / V. Kouprianov // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 41. — P. 1029–1038.
47. Liou, J.-C. Orbital evolution of GEO debris with very high area-to-mass ratios [Electronic resource] / J.-C. Liou, J. K. Weaver // *The Orbital Debris Quarterly News*. — 2004. — V. 8. — Iss. 3. — P. 6.
48. Musci, R. Evolution of the orbital elements for objects with high area-to-mass ratios in geostationary transfer orbits / R. Musci et al. // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 41. — P. 1071–1076.
49. Newland, F. The ROSACE Optical Ground Station / F. Newland, I. Escané, Y. Burnel, F. Nicot, N. Vincent, C. Monestié // *Proc. of SpaceOps 2002 Conference*. — 2002.
50. *Orbital Debris - a Technical Assessment* // NRC, Washington D.C.: Nat. Acad. Press, 1995. — 224 p.
51. *Orbital Debris Quarterly News*. — 2011. — V. 15. — Iss. 3. — P. 3–5.
52. *Orbital Debris Quarterly News*. — 2014. — V. 18. — Iss. 1. — P. 10.
53. *Orbital Debris Quarterly News*. — 2015. — V. 19. — Iss. 1. — P. 9.
54. Oswald, M. Concept for an orbital telescope observing the debris environment in GEO / M. Oswald et al. // *Advances in Space Research*. — 2004. — V. 34. — P. 1155–1159.
55. Pardini, C. Dynamical evolution of debris clouds in geosynchronous orbit / C. Pardini, L. Anselmo // *Advances in Space Research*. — 2005. — V. 35. — P. 1303–1312.

56. Rong-yu Sun. Dynamical evolution of high area-to-mass ratio objects in Molniya orbits / Rong-yu Sun et al. // *Advances in Space Research*. — 2013. — V. 51. — P. 2136–2144.
57. Schildknecht, T. Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits / T. Schildknecht et al. // *Advances in Space Research*. — 2004. — V. 34. — P. 901–911.
58. Schildknecht, T. Properties of the high area-to-mass ratio space debris population at high altitudes / T. Schildknecht, R. Musci, T. Flohrer // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 41. — P. 1039–1045.
59. Schildknecht, T. Ten Years of Observations at the ESA Space Debris Telescope - Discoveries, Highlights and Lessons Learned [Electronic resource] / T. Schildknecht et al. // *Proc. of Fifth European Conf. on Space Debris*. — Darmstadt, 2009 — . — Режим доступа : <http://lfvn.astronomer.ru/report/0000048/004/index.htm> — Загл. с экрана.
60. Schildknecht, T. The search for debris in GEO / T. Schildknecht, M. Ploner, U. Hugentobler // *Advances in Space Research*. — 2001a. — V. 28. — № 9. — P. 1291–1299.
61. Seitzer, P. MODEST observations of space debris at geosynchronous orbit / P. Seitzer et al. // *Advances in Space Research*. — 2004. — V. 34. — P. 1139–1142.
62. Sochilina, A. On statistics of changes in rates of drift among uncontrolled geostationary objects / A. Sochilina et al. // *ESASP*. — 2001. — 473.
63. Valk, S. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator / S. Valk et al. // *Advances in Space Research*. — 2009. — V. 43. — P. 1509–1526.

64. Valk, S. Analytical and semi-analytical investigations of geosynchronous space debris with high area-to-mass ratios / S. Valk, A. Lemaitre, L. Anselmo // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 41. — P. 1077–1090.
65. Valk, S. Semi-analytical investigations of high area-to-mass ratio geosynchronous space debris including Earth's shadowing effects / S. Valk, A. Lemaitre // *Advances in Space Research*. — 2008. — V. 42. — P. 1429–1443.
66. Vallado, D. AIAA paper № 2006-6753 [Electronic resource] / D. Vallado et al. // *Revisiting Spacetrack Report № 3*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. — 2006 — . — Режим доступа : (<http://celestrak.com/publications/AIAA/2006-6753/>) — Загл. с экрана.