

Федеральное агентство по образованию  
Уральский государственный университет  
им. А. М. Горького

# Ф И З И К А   К О С М О С А

Труды 35-й Международной  
студенческой научной конференции

30 января — 3 февраля 2006 г.

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2006

УДК 524.4  
Ф 503

Печатается по решению  
организационного  
комитета конференции

**Физика** Космоса: Тр. 35-й Международ. студ. науч.  
Ф 503 конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2006 г. — Екате-  
ринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. — 313 с.

ISBN 5-7996-0342-7

**Редколлегия:**

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов,  
А. Б. Островский, С. В. Салий, Е. И. Старицин (Уральский государ-  
ственный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский  
государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии  
РАН)

**УДК 524.4**

ISBN 5-7996-0342-7

© Уральский государственный  
университет, 2006

**ФИЗИКА КОСМОСА**  
**35-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ**  
**НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**Организаторы**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра астрономии и геодезии  
Астрономическая обсерватория

**30 января — 3 февраля 2006 г.**

**Екатеринбург, Россия**

**Научный организационный комитет:**

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский государственный университет), А. В. Миронов (ГАИШ МГУ), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет), А. М. Соболев (Уральский государственный университет), А. А. Соловьев (ГАО РАН), Е. И. Старицин (Уральский государственный университет), Г. Ю. Харламов (Институт астрономии РАН), К. И. Чурюмов (Киевский национальный университет), В. В. Шиманский (Казанский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

### **Жюри конкурса студенческих научных работ**

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), А. В. Миرونнов (ГАИШ МГУ), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет).

### **Финансовая поддержка**

Российский фонд фундаментальных исследований

Комитет по делам молодежи администрации Октябрьского района  
г. Екатеринбурга

Уральский государственный университет им. А. М. Горького

## Программа конференции

Место проведения — Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета.

**Открытие конференции.** Аудитория № 15.  
30 января, понедельник, **15.00**

**Пленарные заседания.** Аудитория № 15.  
30 января, понедельник, **15.30–18.45**  
31 января, вторник, **10.00–18.45**  
01 февраля, среда, **10.00–18.45**  
02 февраля, четверг, **14.30–18.45**

**Семинар «Астрофизика».** Аудитория № 10.  
01 февраля, среда, **10.00–12.45**

**Семинар «Физика звезд».** Аудитория № 10.  
01 февраля, среда, **14.30–17.30**

**Семинар «Космическое пространство  
и Солнечная система».** Аудитория № 10.  
02 февраля, четверг, **14.30–17.50**

**Стендовые доклады.** Холл.  
02 февраля, четверг, **12.00–13.00**

**Заккрытие конференции.** Аудитория № 15.  
02 февраля, четверг, **20.00**

30 января, понедельник, ауд. № 15

**15.00–15.30 ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Председатель К. В. Холшевников, д-р физ.-мат. наук**

**15.30–16.15 Борис Михайлович Шустов (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)**

**Российская программа фундаментальных космических исследований.**

**16.15–17.00 Виктор Владимирович Орлов (д-р физ.-мат. наук, НИАИ СПбГУ)**

**Модели Галактики: абстракция и реальность.**

**17.00–17.15 П Е Р Е Р Ы В.**

**17.15–17.30 Борис Сергеевич Сафонов (3 курс, МГУ)**

**Исследование атмосферной оптической турбулентности на Майданаке.**

**17.30–17.45 Алексей Александрович Волосатов (5 курс, СПбГУ)**

**Роль смягчающего параметра в гравитационном потенциале и напряженности спиральной нити.**

**17.45–18.00 Вера Юрьевна Конева (5 курс, УрГУ)**

**Параметры видимой относительной орбиты третьего тела в системе SZ Cam.**

**18.00–18.45 Владислав Владимирович Шиманский (канд. физ.-мат. наук, КГУ)**

**Результаты исследований тесных двойных систем по наблюдениям на БТА САО и РТТ КГУ.**

31 января, вторник, ауд. № 15

Председатель А. В. Миронов, канд. физ.-мат. наук

- 10.00–10.45 Максим Владимирович Юшкин (канд. физ.-мат. наук, САО РАН)  
Спектроскопия высокого разрешения на 6-метровом телескопе БТА.
- 10.45–11.30 Александр Анатольевич Соловьев (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)  
Сейсмология солнечных пятен.
- 11.30–11.45 П Е Р Е Р Ы В.
- 11.45–12.00 Алексей Сергеевич Ерёмин (5 курс, СПбГУ)  
Примеры моделирования гравитирующих тел методом суперпозиции дисков.
- 12.00–12.15 Денис Валерьевич Стеценко (5 курс, КГУ)  
Написание программного комплекса для астрометрических наблюдений и его применение.
- 12.15–12.30 Алексей Михайлович Кононенко (4 курс, ЧелГУ)  
Токовые слои и рентгеновское излучение в магнитосферах молодых звезд.
- 12.30–12.45 Александр Иванович Семенюк (1 курс магистратуры, ВолГУ)  
Моделирование излучающих узлов джетов из молодых звезд.
- 12.45–13.00 Игорь Владимирович Кара (5 курс, ОНУ)  
Интегрирование дифференциальных уравнений движения небесных тел методом Рунге–Кутты 10 порядка.
- 13.30–14.15 О Б Е Д.

31 января, вторник, ауд. № 15

Председатель                    Б. М. Шустов, д-р физ.-мат. наук

- 14.30–15.15 Андрей Михайлович Финкельштейн (д-р физ.-мат. наук, ИПА РАН)  
Радиоинтерферометры со сверхдлинными базами: настоящее и будущее.
- 15.15–16.00 Алексей Васильевич Миронов (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)  
Уроки классиков. Из истории развития астрофотометрии в России и СССР.
- 16.00–16.15 Александра Михайловна Зубарева (4 курс, КГУ)  
Фотометрическое исследование поляра RXJ1846.9+5538.
- 16.15–16.30 Алексей Алексеевич Смирнов (3 курс, СПбГУ)  
Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Types с данными каталога Hipparcos.
- 16.30–16.45 Оксана Владимировна Шелемей (3 курс, УрГУ)  
Наблюдения линий NH<sub>3</sub> в областях массивного звездообразования рукава Персея на 22-метровом телескопе ПРАО ФИАН.
- 16.45–17.00 П Е Р Е Р Ы В.
- 17.00–17.15 Кирилл Владимирович Соколовский (4 курс, МГУ)  
Полуавтоматический поиск переменных объектов на серии ПЗС снимков.
- 17.15–17.30 Александр Сергеевич Степанищев (4 курс, СПбГУ)  
Определение кинематических параметров звезд в окрестности Солнца.
- 17.30–17.45 Алексей Сергеевич Шагинян (2 курс магистратуры, РГУ)  
Радиационный вынос пыли из карликовых галактик при больших красных смещениях.
- 17.45–18.00 Олеся Константиновна Голенищева (1 курс магистратуры, ЧелГУ)  
Влияние амбиполярной диффузии на динамику магнитных трубок в оболочках молодых звезд.

18.00–18.45 Клим Иванович Чурюмов (д-р физ.-мат. наук,  
АО КНУ)  
Космические миссии к ядрам комет — от «Вега» до «Розетты».

1 февраля, среда, ауд. № 15

Председатель **К. И. Чурюмов**, д-р физ.-мат. наук

**10.00–10.45 Олег Станиславович Угольников** (канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН)

Поляризационные исследования атмосферы Земли.

**10.45–11.30 Геннадий Юрьевич Харламов** (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)

Поиск скрытых периодичностей в фотометрических реализациях.

**11.30–11.45 П Е Р Е Р Ы В.**

**11.45–12.00 Ольга Николаевна Туева** (5 курс, ТГУ)

Численное исследование влияния радиационных сил на динамику фрагментов космического мусора.

**12.00–12.15 Вахит Шамильевич Шайдулин** (2 курс магистратуры, УрГУ)

Оценка вероятности столкновения объекта с частицами облака мусора в области геостационарных орбит околоземного пространства.

**12.15–12.30 Иван Николаевич Чувашов** (2 курс магистратуры, ТГУ)

Упрощенный способ определения начального приближения при улучшении орбит.

**12.30–12.45 Александр Андреевич Попов** (4 курс, УрГУ)

Телескоп учебной обсерватории УрГУ.

**12.45–13.00 Сергей Александрович Коржавин** (5 курс, ОНУ)

Сравнительная обработка наблюдений искусственных спутников Земли.

**13.30–14.15 О Б Е Д.**

1 февраля, среда, ауд. № 15

Председатель В. В. Орлов, д-р физ.-мат. наук

- 14.30–15.15 Константин Владиславович Холшевников (д-р физ.-мат. наук, АИ СПбГУ)  
Пространства кеплеровских орбит.
- 15.15–16.00 Юрий Васильевич Хачай (д-р физ.-мат. наук, ИГФ УрО РАН)  
Возможный механизм дифференциации вещества на стадии аккумуляции Земли.
- 16.00–16.15 Ольга Михайловна Дубас (5 курс, ТГУ)  
Применение метода наименьших квадратов в задаче построения областей возможных движений астероидов.
- 16.15–16.30 Роман Владимирович Балугев (5 курс, СПбГУ)  
Освобождение статистики внесолнечных планет от эффектов наблюдательной селекции.
- 16.30–16.45 Наталья Юрьевна Никитина (4 курс, КГУ)  
Работа студентов-геодезистов на объектах города Казани.
- 16.45–17.00 П Е Р Е Р Ы В.
- 17.00–17.15 Александр Сергеевич Польченко (4 курс, ТГУ)  
Способ улучшения орбит по смешанным рядам наблюдений.
- 17.15–17.30 Юлия Ф. Тагирова (4 курс, ТГУ)  
Исследование эффективности симметрических интеграторов для решения задач астероидной динамики.
- 17.30–17.45 Дмитрий Анатольевич Блинов (3 курс, СПбГУ)  
Статистические закономерности распределения орбитальных параметров и физических характеристик астероидов.
- 17.45–18.00 Иван Леонидович Бызов (4 курс, УрГУ)  
Особенности обработки ПЗС-изображений рассеянных звездных скоплений камеры SBG.
- 18.00–18.45 Андрей Михайлович Соболев (канд. физ.-мат. наук, АО УрГУ)  
Метанольные мазеры и звездообразование.

2 февраля, четверг, ауд. № 15

Председатель            А. А. Соловьев, д-р физ.-мат. наук

- 14.30–15.15 Станислав Олегович Алексеев (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)  
Современные расширения общей теории относительности.
- 15.15–16.00 Виктор Васильевич Мусцовой (д-р физ.-мат. наук, ВолГУ)  
Эффект Россби и проблема солнечной активности.
- 16.00–16.45 Александр Иванович Малышев (канд. г.-м. наук, ИГГ УрО РАН)  
Условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы.
- 16.45–17.00 П Е Р Е Р Ы В.
- 17.00–17.15 Андрей Михайлович Соболев (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)  
Резюме стендовой секции.
- 17.15–18.00 Дмитрий Зигфридович Вибе (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)  
Откуда берутся звезды.
- 18.00–18.45 Игорь Иванович Зинченко (д-р физ.-мат. наук, ИПФ РАН)  
Физико-химическая структура областей образования массивных звезд.
- 20.00 ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ.

Семинар «Астрофизика»  
1 февраля, среда, ауд. № 10, 10<sup>00</sup>–12<sup>45</sup>

Председатель **Д. З. Вибе, д-р физ.-мат. наук**

**10.00–10.45 Борис Михайлович Шустов (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)**

Обсерватория в Терсколе — настоящее и будущее.

**10.45–11.00 Евгений Павлович Курбатов (аспирант, Институт астрономии РАН)**

Модель химико-динамической эволюции галактик.

**11.00–11.15 Мария Сергеевна Кирсанова (аспирант, Институт астрономии РАН)**

Исследование областей массивного звездообразования в спиральном рукаве Персея.

**11.15–11.30 Антон Иванович Васюнин (аспирант, УрГУ)**

Стохастическое моделирование химической эволюции МЗС с учетом газопылевого взаимодействия.

**11.30–11.45 П Е Р Е Р Ы В.**

**11.45–12.00 Светлана Викторовна Салий (научный сотрудник, АО УрГУ)**

База данных для оценки физических параметров молекулярных облаков по интенсивностям радиолиний метанола.

**12.00–12.15 Надежда Николаевна Шахворостова (научный сотрудник, АКЦ ФИАН)**

О влиянии ударных переходов на космологический рекомбинационный спектр водорода.

**12.15–12.30 Галина Николаевна Дремова (канд. физ.-мат. наук, РФЯЦ-ВНИИТФ)**

Динамическая эволюция скопления галактик в рамках задачи N-тел. Образование сверхмассивных cD-галактик.

**12.30–12.45 Мария Эриковна Попова (научный сотрудник, АО УрГУ)**

Анализ распределения молодых звездных объектов в плоскости Галактики с применением вейвлет-сглаживания.

Семинар «Физика звезд»  
1 февраля, среда, ауд. № 10, 14<sup>30</sup>—17<sup>30</sup>

Председатель В. В. Шиманский канд. физ.-мат. наук

- 14.30–15.15 Александр Анатольевич Соловьев (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)  
Природа 22-летнего солнечного цикла.
- 15.15–15.30 Алла Валерьевна Кожевникова (научный сотрудник, АО УрГУ)  
Особенности пятенной активности избранных двойных звезд поздних спектральных классов.
- 15.30–15.45 Алексей Юрьевич Сытов (аспирант, Институт астрономии РАН)  
Параллельный AMR-код для моделирования многомерных самогравитирующих МГД течений.
- 15.45–16.00 Павел Вячеславович Кайгородов (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)  
О возможном механизме рентгеновского излучения BE/X звезд.
- 16.00–16.15 Максим Владимирович Юшкин (канд. физ.-мат. наук, САО РАН)  
К проблеме эволюционного статуса полуправильной переменной QYSge.
- 16.15–16.30 Галина Николаевна Дремова (канд. физ.-мат. наук, РФЯЦ-ВНИИТФ)  
Сравнительный анализ «точных» и «приближенных» методов оценки абсолютных и относительных элементов разделенных и предконтактных тесных двойных систем.
- 16.30–16.45 Екатерина Анатольевна Аввакумова (аспирант, УрГУ)  
Анализ результатов синтеза кривых блеска массивных тесных двойных систем.
- 16.45–17.00 П Е Р Е Р Ы В.
- 17.00–17.15 Олег Станиславович Угольников (канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН)  
Дистанционное зондирование атмосферы на основе фотометрии лунных затмений.

**17.15–17.30 Надежда Михайловна Костогрыз (аспирант,  
ГАО НАНУ)**

Оптические параметры неизотермичной атмосферы Урана по данным об интенсивностях деталей комбинационного рассеяния.

Семинар «Космическое пространство и Солнечная система»  
2 февраля, четверг, ауд. № 10, 14<sup>30</sup>—17<sup>50</sup>

Председатель Г. Ю. Харламов, д-р физ.-мат. наук

- 14.30–14.45 Клим Иванович Чурюмов (д-р физ.-мат. наук, АО КНУ)  
О размерах искусственного кратера на ядре кометы 9P/Темпеля.
- 14.45–15.00 Антон Александрович Токовенко (аспирант, ОНУ)  
Модель Солнечной системы.
- 15.00–15.15 Мария Александровна Баньщикова (научный сотрудник, ТГУ)  
Моделирование областей возможных движений спутников Юпитера.
- 15.15–15.30 Александра Викторовна Иванова (канд. физ.-мат. наук, ГАО НАНУ)  
Исследование влияния геометрии активных областей кометного ядра на их температурный режим.
- 15.30–15.45 Альберт Ринадович Челябинов (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)  
Алгоритм обработки измерений в узкопольных оптико-электронных средствах наблюдения низкоорбитальных космических объектов.
- 15.45–16.00 Виктор Владимирович Богатырев (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)  
Особенности проведения обработки фотометрической информации низкоорбитальных КА.
- 16.00–16.15 Вадим Геннадьевич Грачев (аспирант, Институт астрономии РАН)  
Исследование показателей эффективности метода стандартизации телевизионных фотометрических реализаций.
- 16.15–16.30 Анна Петровна Карташова (аспирант, Институт астрономии РАН)  
Результаты обработки и наблюдений метеорных потоков с использованием телевизионных оптико — электронных систем.

- 16.30–16.45 Дмитрий Леонидович Титов (5 курс, УрГУ)**  
Определение координат искусственного спутника Земли по результатам обработки серии снимков.
- 16.45–17.00 П Е Р Е Р Ы В.**
- 17.00–17.15 Сергей Алексеевич Орлов (научный сотрудник, НИИАИ СПбГУ)**  
Структура облака частиц образованного взрывом на орбите.
- 17.15–17.30 Залимхан Нурланович Турлов (аспирант, Институт астрономии РАН)**  
Алгоритм определения спектральных коэффициентов отражения материалов покрытий КА.
- 17.30–17.50 Юлия Александровна Никитинова (аспирант, УрГУ)**  
Археoaстрономия: проблемы становления и развития.

Стендовые доклады  
2 февраля, четверг, холл, 12<sup>00</sup>—13<sup>00</sup>

Председатель      А. М. Соболев, канд. физ.-мат. наук

1. **Goedhart S.** (HartRAO), **А. М. Соболев** (АО УрГУ), **Островский А. Б.** (УрГУ), **J. Van der walt** (NWU), **M. Gaylard** (NWU)  
Variability of class II methanol masers
2. **В. Э. Берланд** (АО УрГУ)  
Поиск алгоритма определения минимального расстояния между двумя кеплеровскими орбитами средствами символической алгебры
3. **Д. З. Вибе, Я. Н. Павлюченков** (Институт астрономии РАН), **Р. Н. Лаунхардт, Т. Н. Хеннинг** (Институт астрономии Общества им. М. Планка)  
Химическая история дозвездного ядра CB17.
4. **С. Ю. Горда** (АО УрГУ)  
Оценки расстояния до SZ Сам и массы третьего тела.
5. **П.Е. Захарова, Э. Д. Кузнецов, Д. В. Гламазда** (АО УрГУ)  
Анализ результатов наблюдений геосинхронных спутников в окрестности устойчивой точки либрации.
6. **А. А. Калинин, В. В. Крушинский, А. И. Шагабутдинов** (АО УрГУ)  
Спектрофотометрия солнечных активных образований на солнечном телескопе АЦУ-5 АО УрГУ с помощью ПЗС-матрицы SXV-H9 StarlightXPress.
7. **Н. Д. Калинина** (АО УрГУ)  
Вращательные температуры и лучевые концентрации молекул  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$  в ядре W3(OH).
8. **В. П. Кожевников** (АО УрГУ)  
Обнаружение когерентных колебаний блеска с периодом 3.353 часа в сверхмягком рентгеновском источнике RX J0019.8+2156 (QR And).
9. **В. В. Крушинский, И. С. Заложных** (УрГУ)  
Преобразователи фокусного расстояния телескопа Кассегрена.

10. **Э. Д. Кузнецов** (АО УрГУ)  
Об эволюции эксцентриситета геосинхронной орбиты критического наклона.
11. **Т. П. Никифорова** (АО УрГУ), **А. М. Поляков**, **Н. В. Панкратова**, **Т. В. Струнина** (УрГУ)  
Некоторые оптические проявления рентгеновской солнечной вспышки 13 июля 2005 года.
12. **А. Б. Островский** (УрГУ), **А. М. Соболев** (АО УрГУ), **М. А. Воронков** (ATNF CSIRO)  
Режимы накачки метанольных мазеров I класса.
13. **Е. Л. Перевозкина** (Министерство общего и профессионального образования Свердловской области)  
Анализ возрастов маломассивных РГП-систем.
14. **Е. Л. Перевозкина** (Министерство общего и профессионального образования Свердловской области)  
Планета по имени Бахчиванджи.
15. **Г. С. Ромашин** (АО УрГУ)  
Российская группировка геостационарных спутников.
16. **С. В. Салий**, **А. М. Соболев** (АО УрГУ)  
Зависимость оценок физических параметров областей массивного звездообразования от выбора модели.
17. **Н. Н. Шахворостова** (АКЦ ФИАН)  
О кинетике космологической рекомбинации водорода.
18. **М. А. Эбель** (ЧелГУ)  
Оценка вероятности открытия КР-систем как затменных переменных для случая полного потемнения диска звезды к краю.

# Обзорные лекции

С. О. Алексеев

Государственный астрономический  
институт им. П. К. Штернберга

## СОВРЕМЕННЫЕ РАСШИРЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### Введение

В настоящее время общая теория относительности (ОТО) является наиболее используемой теорией при описании гравитационного взаимодействия в тех областях, где неприменима теория Ньютона. Однако наряду с несомненными достоинствами, в этой теории имеется ряд черт, которые делают необходимым ее дальнейшую модернизацию и расширение границ применимости. К сожалению, ОТО не может быть проквантована так же, как теории других известных физических взаимодействий (например, электродинамика), что необходимо для описания процессов при рождении Вселенной или в физике черных дыр [1]. Поэтому в мире идет активный поиск альтернативных самосогласованных теорий, которые, включая в себя ОТО как предел при низких энергиях, имели бы математически более адекватное описание в области больших энергий.

Поиск таких моделей начался уже давно. С самого начала предпринимались попытки расширения ОТО введением в нее дополнительных полей, метрических членов или распространением ее на большее число пространственно-временных измерений. Короткому рассказу о некоторых из этих подходов и посвящена настоящая лекция. Информацию о современном состоянии данной проблемы можно найти через поисковую систему <http://www.slac.stanford.edu/spires/hep/>

---

© С. О. Алексеев, 2006

а

б

в

Рис. 1. Членам порядка  $\hbar^0$  соответствуют: «древесные» диаграммы (а), членам порядка  $\hbar^1$  — «однопетлевые» диаграммы (б), членам порядка  $\hbar^N$  ( $N > 1$ ) — «многопетлевые» диаграммы (в)

## Квантование теории относительности

В квазиклассическом приближении (когда квантовые флуктуации малы и еще можно пользоваться классическим подходом) для описания квантовых процессов вводятся в рассмотрение средние значения физических величин, например, метрики  $\langle g_{\mu\nu} \rangle$ , тензора энергии-импульса  $\langle T_{\mu\nu} \rangle$ , ... Вводимые величины удовлетворяют модифицированным уравнениям Эйнштейна  $G_{\mu\nu} = 8\pi \langle T_{\mu\nu} \rangle$ . Здесь  $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$  — тензор Эйнштейна, мы работаем в системе единиц, где скорость света  $c = 1$ . В областях, где характерный размер  $L$  много больше длины Планка  $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$ , то есть  $L \gg l_{Pl}$ , можно использовать разложение по малому параметру  $\epsilon = (l_{Pl}/L)^2$  и ограничиться первыми членами разложения. Первый член порядка  $\epsilon^0$  совпадает с выражением для тензора энергии-импульса классического поля, член порядка  $\epsilon^1$ , содержащий множитель  $\hbar$ , дает основной вклад квантовых эффектов. Следующие по  $\epsilon$  члены — это поправки, связанные с излучением и поглощением виртуальных частиц. Важно подчеркнуть, что при использовании диаграммной техники, широко применяемой в физике высоких энергий, членам порядка  $\hbar^0$  соответствуют «древесные» диаграммы (рис. 1, а), членам порядка  $\hbar^1$  — «однопетлевые» диаграммы (рис. 1, б), членам порядка  $\hbar^N$  ( $N > 1$ ) — «многопетлевые» диаграммы (рис. 1, в) [2].

Основная проблема при изучении  $\langle T_{\mu\nu} \rangle$  состоит в том, что эта величина расходится. То есть если необходимо вычислить произведение нескольких операторов поля в совпадающих точках, то бес-

конечности появятся уже в плоском пространстве-времени. Методы выделения конечной, имеющей физический смысл части  $\langle T_{\mu\nu} \rangle$  разрабатывались в физике высоких энергий и носят название «перенормировка» [3].

Для классического конформно-инвариантного поля тензор энергии-импульса бесследовый, то есть  $T_{\mu}^{\mu} = 0$ . Важным свойством перенормированного тензора  $\langle T_{\mu\nu} \rangle^{ren}$  является наличие у него следа (это явление называется «конформная аномалия»). Ненулевой след тензора энергии-импульса имеет вид [1]

$$\begin{aligned} \langle T_{\mu\nu} \rangle^{ren} &= a_s(C_{\alpha\beta\gamma\delta}C^{\alpha\beta\gamma\delta} + \frac{2}{3}\square R) \\ &+ b_s(R_{\alpha\beta\gamma\delta}R^{\alpha\beta\gamma\delta} - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} + R^2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C_{\alpha\beta\gamma\delta}$  — тензор Вейля;  $a_s = \tilde{a}_s/(5760\pi^2)$ ;  $b_s = \tilde{b}_s/(5760\pi^2)$ ; коэффициенты  $\tilde{a}_s$  и  $\tilde{b}_s$  для различных спинов  $s$  имеют свои значения, которые можно посмотреть в [1] (вычислены они были в [4]).

Заметим, что уже здесь происходит изменение формы ОТО за счет добавления дополнительных метрических членов. Здесь же мы впервые встречаемся с комбинацией

$$S_{GB} = R_{\alpha\beta\gamma\delta}R^{\alpha\beta\gamma\delta} - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} + R^2,$$

которая имеет свое название: «член Гаусса—Боннэ». Являясь эйлеровой характеристикой 1-го порядка, член Гаусса—Боннэ в четырехмерном пространстве-времени является полной дивергенцией [5].

## Гравитация второго и следующих порядков по кривизне

### Преобразования Хиггса

В 1959 г. Хиггсом [6] было показано, что при рассмотрении лагранжианов, квадратичных по тензору Римана (все эти лагранжианы инвариантны при преобразовании Вейля  $g_{\mu\nu} \rightarrow \varphi(x)g_{\mu\nu}$ ), и варьировании их по  $g_{\mu\nu}$  и  $\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma}$  независимо получают следующие уравнения

(случаи (A), (B), (C)):

$$\begin{aligned}
I_A &= \int d^4x R^2 \sqrt{-g}, \\
\frac{\delta I_A}{\delta g_{\mu\nu}} &= R(R_{(\mu\nu)} - \frac{1}{4}Rg_{\mu\nu}) = 0, \\
\frac{\delta I_A}{\delta \Gamma_{\mu\nu}^\sigma} &= (Rg^{\alpha\beta} \sqrt{-g})_{\chi} = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_B &= \int d^4x R_{\lambda\mu} R^{\lambda\mu} \sqrt{-g}, \\
\frac{\delta I_B}{\delta g_{\mu\nu}} &= (R_{\mu\rho} R_{\nu\sigma} + R_{\nu\rho} R_{\mu\sigma}) g^{\rho\sigma} - \frac{1}{2} R_{\rho\sigma} R^{\rho\sigma} g_{\mu\nu} = 0, \\
\frac{\delta I_B}{\delta \Gamma_{\mu\nu}^\sigma} &= (R^{(\alpha\beta)} \sqrt{-g})_{\chi} = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_C &= \int d^4x R_{\lambda\mu\nu}^\chi R^{\lambda\mu\nu} \sqrt{-g}, \\
\frac{\delta I_C}{\delta g_{\mu\nu}} &= -R_{\mu\rho\sigma\tau} R_{\nu}^{\rho\sigma\tau} + R_{\mu\sigma\tau}^\pi R_{\pi\nu}^{\sigma\tau} + 2R_{\pi\rho\mu}^\tau R_{\nu\tau}^{\pi\rho} \\
&\quad - \frac{1}{2} R_{\pi\rho\sigma\tau} R^{\pi\rho\sigma\tau} g_{\mu\nu} = 0, \\
\frac{\delta I_C}{\delta \Gamma_{\mu\nu}^\sigma} &= (R_{\chi}^{(\alpha\beta)\gamma} \sqrt{-g})_{\gamma} = 0.
\end{aligned}$$

Хиггс показал, что в случаях (A) и (B) уравнения поля сводятся к уравнениям типа Эйнштейна с космологической постоянной в новой метрике. Второй набор уравнений характеризует соотношение старой и новой метрик. Решив эти уравнения, можно найти функцию перехода (калибровочную функцию). В случае (A) получается уравнение вида  $R_{(\mu\nu)} = \lambda \psi^{-1} g_{\mu\nu}$ , которое можно преобразовать к уравнению  $R_{(\mu\nu)} = \lambda a_{\mu\nu}$ , где  $a_{\mu\nu}$  — новая метрика, найдя которую можно восстановить исходную метрику  $g_{\mu\nu}$ . Аналогично можно рассмотреть случай (B), для (C) такого преобразования найдено не было.

Эта работа была одной из первых, где (пока еще без специальной мотивации) рассматривались более сложные виды гравитационного действия.

## Гравитация Лавлока

Лавлок [7] рассмотрел требования к тензору Эйнштейна в вакууме  $G_{\mu\nu}$ . Они следующие:

1. Тензор  $G_{\mu\nu}$  должен быть симметричен относительно перестановок индексов, то есть  $G_{\mu\nu} = G_{\nu\mu}$ ;
2. Тензор  $G_{\mu\nu}$  составлен из метрики, ее первых и вторых производных;
3.  $G^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$ ;
4. Тензор  $G_{\mu\nu}$  линеен по вторым производным от метрики.

Лавлок исследовал, что произойдет при отказе от требования (4). Он показал, что в случае четырехмерного пространства-времени наиболее общий вид лагранжиана второго порядка (не создающего дополнительных проблем в гравитации)

$$L = \sqrt{-g}(\alpha R^2 + \beta R_{ij}R^{ij} + \gamma R_{ijkl}R^{ijkl}) + \mu R_{ijkl} {}^*R^{ijkl}, \quad (2)$$

где  ${}^*R$  — дуальная величина.

Здесь мы снова встречаемся с членом Гаусса—Боннэ (первая скобка). То есть еще до попыток квантования гравитации было показано, что добавление этого члена в действие не приводит к появлению каких-то аномалий.

## Модели Бранса—Дикке

Модели гравитации со скалярным полем (Бранса—Дикке) имеют вид  $L = \sqrt{-g}\phi R$ . Эти модели после преобразований можно свести к виду  $L = \sqrt{-g}(R + \partial_\mu\phi\partial^\mu\phi + V(\phi))$ .

### Модели космологии с членами типа $R^2$

Модели с членами типа  $R^2$  в применении к космологии ([8, 9] и ссылки в них) разрабатывались А. А. Старобинским и Д. Виттом. Было показано, что лагранжиан вида  $L = (aR + bR^2)\sqrt{-g}$  часто можно свести к моделям типа Бранса—Дикке заменой  $\phi = a + bR$ . Космологическое решение типа разбегающейся Вселенной возможно при

$$V(\phi) = \frac{(1 - e^{-\phi})^2}{8\alpha}. \quad (3)$$

*Рис. 2. Шкала энергий современной физики*

## Теория суперструн/М-теория

В современной физике принята шкала энергий, приведенная на рис. 2. При этом объединение электрослабого и сильного взаимодействий (великое объединение на уровне квантовой теории поля) еще не требует введения дополнительных размерностей. Только при попытках создать теорию ВСЕХ физических взаимодействий необходимо вводить дополнительные измерения и переходить от квантовой теории поля (очень хорошо зарекомендовавшей себя в физике высоких энергий) к каким-то более общим теориям. Одним из популярных подходов (наряду с построением петлевой квантовой гравитации, см. [10]) является теория струн [11], citegreen2 и ее обобщение, названное «М-теория».

Теория струн — теория взаимодействия двумерных объектов (струн) на фоне многомерного пространства-времени. Является обобщением квантовой теории поля. Низкоэнергетический предел — 10-мерная супергравитация. Существует 5 типов теорий струн.

М-теория — теория взаимодействия многомерных объектов (мембран, бран) на фоне многомерного пространства-времени. Являются обобщением струн. Низкоэнергетический предел — 11-мерная супергравитация.

Так как вышеназванные теории существуют в многомерном пространстве-времени, а мы живем в четырехмерном (что каждый может легко проверить сам...), то встает вопрос о методах перехода из

десяти измерений в четыре. На настоящий момент в основном рассматриваются следующие методы компактификации дополнительных измерений:

1. Стандартная (Kaluzza—Klein);
2. Модель Arkani—Dimitropolu—Davali (ADD): физические частицы движутся внутри браны с объемом;
3. Universal extra dimensions: все частицы распространяются во всем пространстве, дополнительные измерения менее 100 ГэВ;
4. Модели Randall—Sundrum типа I и II (+ Dvali—Gabadadze—Parratti).

Не вдаваясь в детали типов компактификации, необходимо отметить, что при применении каждого из этих методов возникает своя «эффективная» теория гравитации, немного отличающаяся от ОТО и имеющей ОТО как предел.

### Эффективное действие струнной гравитации

Одним из вариантов низкоэнергетического предела струнной гравитации является струнное действие с поправками высших порядков по кривизне (учитывающие многопетлевые диаграммы) [13]

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} [-R + \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi + e^{-2\phi} L_{GB} + e^{-4\phi} L_3 + \dots]. \quad (4)$$

При изучении данного действия возможны решения типа «черная дыра» с необычными свойствами. В частности, в черной дыре Гаусса—Боннэ можно получить ограничение на минимальную массу и соответственно остановку Хокинговского испарения. Различные законы испарения черной дыры показаны на рис. 3. (Детали вычислений можно посмотреть в [15].)

### Модели некомпактных дополнительных измерений

При введении в рассмотрение предположения о некомпактности дополнительных измерений [16] возникает несколько интересных

*Рис. 3.* Законы испарения различных типов черных дыр. В случае черной дыры Шварцшильда закон испарения будет иметь вид  $-dM/dt \approx M^{-2}$ . Вводя «руками» закон сохранения энергии (энергия излучаемого кванта не может быть больше энергии черной дыры) с помощью функции Хевисайда, можно получить остановку испарения (Toy models). Испарение черной дыры Гаусса—Боннэ (SGB) также останавливается при достижении минимального значения. Законы испарения черных дыр в моделях с некомпактными дополнительными измерениями еще предстоит установить

следствий. Одним из них является смещение значения фундаментальной массы Планка по формуле

$$M_D = \left( \frac{M_{Pl}^2}{V_{D-4}} \right)^{1/(D-2)}.$$

В этом случае при размере дополнительных измерений, сравнимом с верхним ограничением на их существование из экспериментов по проверке закона Ньютона (0.1 мм), можно получить фундаментальную массу Планка в диапазоне 1 ТэВ. В этом энергетическом диапазоне будет работать строящийся сейчас ускоритель ЛНС (Large Hadron Collider) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). То есть становится возможной проверка законов квантовой гравитации экспериментально. Это значит, что если идея некомпактных дополнительных измерений верна и эти измерения действительно лежат в диапазоне 0.1 мм, черные дыры можно будет получать экспериментально и исследовать их свойства по продуктам распада на ускорителе. Тогда же станет возможным ответ на вопрос, какого типа черные дыры реализуются в природе.

Например, решение Шварцшильда в многомерном ( $N > 4$ ) пространстве-времени (если размеры рассматриваемых объектов сравнимы с размерами дополнительных измерений, то при рассмотрении только гравитационного взаимодействия можно использовать в качестве модели простое многомерное пространство-время без дополнительных топологических усложнений) имеет вид [17]

$$ds^2 = -R(r)dt^2 + R^{-1}(r)dr^2 + r^2 d\Omega_{n+2}^2, \quad (5)$$

где метрические функции имеют вид

$$R(r) = 1 - \left( \frac{r_s}{r} \right)^{n+1}. \quad (6)$$

Можно найти многомерное решение типа «черная дыра Гаусса–Боннэ» [18]. Результат сравнения температур этих решений показан на рис. 4. Из этого сравнения видно, что температуры различных типов черных дыр отличаются, то есть, по результатам эксперимента (в случае его положительного исхода) можно будет отождествить его результат [19].

На данный момент в литературе рассматриваются и другие направления проверки идеи некомпактных дополнительных измере-

*Рис. 4.* Отношение температур черной дыры Шварцшильда—Гаусса—Боннэ и просто Шварцшильда в случае многомерного пространства-времени при различных значениях  $D$  — размерности пространства и  $\lambda$  — струнной константы связи

ний, а именно в экспериментах с широкими атмосферными ливнями, в экспериментах по уточнению эффекта Грейзена—Зацепина—Кузьмина (наличие космических лучей сверхвысоких энергий), а также по астрономическим данным (космические струны, другие типы топологических дефектов, ...).

### Что дальше?

В настоящий момент активно исследуются следующие направления поиска новой физики:

- Модели некомпактных дополнительных измерений.
- Модели нарушения Лоренц-инвариантности.
- Теория струн/М-теория, низкоэнергетический предел.
- Космология, инфляция.
- Улучшение канонической версии теории относительности (законы сохранения, ...).

Одна из целей современной физики, по мнению С. Хокинга: «Получить космологию как решение М-теории» (S. W. Hawking, 2001, высказывание на конференции), то есть найти связь между красивыми теориями и реальными явлениями.

### Список литературы

1. Новиков И. Д., Фролов В. П. Физика черных дыр. М.: Наука, 1986.
2. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984.
3. De Witt B. S. Dynamical Theory of Groups and Fields. N. Y.: Gordon and Breach, 1965.
4. Duff M. J. Observations on Conformal Anomalies // Nucl. Phys. B. 1977. Vol. 125. P. 334.
5. Zwiebach B. Curvature squared terms and string theories // Phys. Lett. B. 1985. Vol. 156. P. 315.
6. Higgs P. W. Quadratic Lagrangians and General Relativity // Nuovo Cimento 1959. Vol. 11. V. 10, P. 816.

7. *Lovelock D.* The Einstein Tensor and its Generalizations // J. of Math. Phys. 1971. Vol. 12. P. 498.
8. *Maeda K.* Inflation as a transient attractor in  $R^2$  cosmology // Phys. Rev. D. 1988. Vol. 37. P. 858.
9. *Barrow J. D., Cotsakis S.* Inflation and the Conformal Structure of Higher Order Gravity Theories // Phys. Lett. B. 1988. Vol. 214 P. 515.
10. *Ashtekar A.* Gravity and the quantum // New J. of Physics. 2005. Vol. 7. P. 198.
11. *Грин М., Шварц Дж., Виттен Э.* Теория суперструн. М.: Мир, 1990.
12. *Schwarz J. H.* The future of string theory // J. Math. Phys. 2001. Vol. 42. P. 2889.
13. *Alexeyev S. O., Pomazanov M. V.* Black Hole Solutions with Dilatonic Hair in Higher Curvature Gravity // Phys. Rev. D. 1997. Vol. 55. P. 2110.
14. *Page D. N.* Hawking Evaporation and Black Hole Thermodynamics // New J. of Physics. 2005. Vol. 7. P. 203.
15. *Alexeyev S., Barrau A., Boudoul G. et al.* Black Hole Relics in String Gravity: Last Stages of Hawking Evaporation // Class. Quant. Grav. 2002. Vol. 19. P. 4431.
16. *Рубаков В. А.* Большие и бесконечные дополнительные измерения // УФН. 2001. Т. 171 С. 903.
17. *Myers R. C., Perry N. J.* Black Holes in Higher Dimensional Space Times // Annals of Physics. N. Y., 1986. Vol. 172. P. 304.
18. *Cai R. G.* Gauss–Bonnet Black Holes in AdS Spaces // Phys. Rev. D. 2002. Vol. 65. P. 084014.
19. *Barrau A., Garain J., Alexeyev S.* Gauss–Bonnet Black Holes at the LHC: beyond the Dimensionality of Space // Phys. Lett. B. 2004. Vol. 584. P. 114.

В. Н. Анфилов<sup>1</sup>, Ю. В. Хачай<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт минералогии УрО РАН

<sup>2</sup>Институт геофизики УрО РАН

## ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВЕЩЕСТВА НА ЭТАПЕ АККУМУЛЯЦИИ ЗЕМЛИ

Важнейшая проблема, связанная с динамикой аккумуляции тел, до сих пор остается плохо изученной. Формирование планет из протопланетного облака является сложнейшим процессом. За последнее десятилетие в связи с обнаружением более 100 планетных систем у ряда молодых звезд в исследовании проблемы достигнуто существенное продвижение. Получены решающие аргументы в пользу предположения о том, что звезды и планеты сформировались в едином процессе в результате коллапса плотных ядер газовых облаков [1]. В современных моделях эволюции протопланетного облака выделяют несколько основных стадий [1]–[3]: гравитационный коллапс, аккреция протозвездного облака; оседание пылевых частиц на центральную область и формирование вращающегося диска; начало фрагментации диска с образованием тел и частиц с размерами до 1 см и этап аккумуляции, в котором тела от размеров 0.1–10 км вырастали до размеров планет.

Результаты изучения современной структуры, состояния и состава внутренних оболочек Земли позволили установить, что под очень тонкой земной корой прослеживается преимущественно силикатная мантия, которая на глубине около 2900 км от поверхности граничит с преимущественно железным по составу ядром Земли. Основная проблема при разработке моделей формирования Земли и планет земной группы связана с необходимостью объяснения механизма образования «железного» ядра и «силикатной» мантии. Для ее решения предложены различные варианты, которые можно объединить в две группы: модели гомогенной аккумуляции, предполагающие, что первоначально была сформирована квазиоднородная Земля, а дифференциация на ядро и мантию произошла после завершения аккумуляции, и модели неоднородной аккумуляции, в которых предполагается, что железное ядро Земли формируется на стадии аккумуляции.

---

© В. Н. Анфилов, Ю. В. Хачай, 2006

К гомогенной аккумуляции приводит модель формирования планеты из пылевых и мелких частиц. При падении таких тел не образуются глубокие кратеры, энергия соударения выделяется в тонком поверхностном слое и в основном сбрасывается излучением с поверхности растущего зародыша. Поэтому температура в центре планеты остается ниже температуры солидуса [2, 4, 5]. Выплавление вещества ядра в этой модели могло начаться только в верхних слоях Земли, разогретых при падении на ее поверхность крупных тел [2]—[5]. Оставляя в стороне трудности, связанные с физическим обоснованием механизмов транспортировки «ядерного» вещества в центр Земли заметим, что все оценки времени опускания вещества в ядро [3] оказываются резко завышенными по сравнению как с возрастом существования геомагнитного поля, так и с длительностью процесса образования ядра, фиксируемой свинцовой и изотопными, например W-Nf, системами [6]. Не удается согласовать модели гомогенной аккумуляции и с энергетическими аспектами проблемы [5].

Модели гетерогенной аккумуляции сталкиваются с другой трудностью. Гетерогенная аккумуляция должна контролироваться порядком конденсации вещества в протопланетном облаке и начаться с составов, которые конденсировались первыми. Последовательность конденсации зависит от P-T-условий в протопланетном облаке и представляет собой самостоятельную проблему [1]. Из современных оценок следует, что в области планет земной группы прежде всего конденсируются корунд, перовскит, мелилит и шпинель и лишь затем происходит конденсация железа и силикатов Mg и Ca. Поэтому и в этом варианте также остается проблема транспортировки железа к центру Земли. В последнее время для объяснения распределения вещества в системе Земля—Луна интенсивно обсуждается модель мегаимпакта, которая предполагает, что на завершающем этапе ее аккумуляции произошло столкновение Земли с крупным телом, по массе близким к Меркурию. Это обеспечило катастрофический разогрев Земли и вызвало процесс формирования ее ядра. Трудно ожидать, что такой случайный процесс мог закономерно повториться при формировании ядер всех планет земной группы. Наряду геохимических проблем, противоречащих этой модели, указано в [7]. В настоящей работе предложена модель аккумуляции Земли и планет земной группы, которая не содержит отмеченных трудностей.

Основную информацию о составе вещества и P-T-условиях в протопланетном облаке предоставляют метеориты. Для того чтобы по-

строить адекватную модель формирования планет, необходимо учитывать данные не только о составе метеоритов, но и об эволюции, которую они прошли от конденсации из газового облака до образования родительских тел. По характеру эволюции метеориты подразделяют на первичные и дифференцированные [8]. К первым относят углистые хондриты, которые содержат вещество, выделившееся на ранней, высокотемпературной стадии конденсации небулярного газа. Ко второй группе относят железные метеориты, палласиты и, возможно, эвкриты [8]. Наиболее точно минеральному составу продуктов высокотемпературной стадии конденсации соответствуют грубозернистые агрегаты CAI из углистых хондритов, которые состоят из шпинели  $MgAl_2O_4$  (15–20 об. %), геленита  $Ca_2Al[(SiAl)_2O_7]$  (80–85 об.%) и перовскита  $CaTiO_3$  (1–2 об.%) [8, 9]. Не смотря на редкость встречаемости включений такого состава, их наличие является убедительным доказательством того, что в процессе конденсации вещества из газового облака соблюдалась отмеченная выше последовательность.

О состоянии протопланетного вещества на ранних этапах и характере его дифференциации можно судить по степени метаморфизма вещества метеоритов различных классов. Присутствие стекла в хондрах углистых хондритов свидетельствует о том, что после образования они прошли стадию агломерации и частичного плавления [8]. Из диаграмм фазовых равновесий в системах  $CaO - SiO_2 - Al_2O_3$ ,  $CaSiO_3 - CaSiTiO_5 - CaAlSi_3O_8$  и  $Mg_2SiO_4 - SiO_2 - CaAl_2Si_2O_8$  [9] следует, что они были нагреты до температур  $1800 \pm 50$  К. Несомненные признаки кристаллизации из расплава имеет вещество эвкритовых метеоритов [8]. Кристаллизация расплавов в системе Диопсид–Плагиоклаз–Форстерит, которая моделирует минеральный состав эвкритов, происходит в интервале 1600–1550 К [10]. Состояние полного плавления прошло вещество железных метеоритов [8]. Температура плавления железо-никелевого сплава этих метеоритов с учетом небольших добавок FeS составляет около 1720 К.

Чрезвычайно важную информацию о дифференциации вещества при формировании родительских тел метеоритов дают железные метеориты и палласиты. Во-первых, наличие таких метеоритов свидетельствует о том, что в небольших по размеру родительских телах имело место четкое разделение на силикатную и железо-никелевую составляющие. Во-вторых, минеральный состав палласитов, состоящих из железо-никелевого сплава и оливина, согласуется с последовательностью конденсации вещества в газообразном протопланет-

ном облаке. В-третьих, равномерное распределение зерен оливина в железо-никелевом сплаве палласитов свидетельствует о том, что дифференциация вещества при образовании родительских тел метеоритов происходила в слабом гравитационном поле. Это накладывает ограничение на размеры родительских тел. Они к рассматриваемому моменту не могли превышать первые сотни километров. Железо-никелевая компонента палласитов несомненно имеет расплавленную природу, но температура плавления оливина равна 1970—2070 К и он вряд ли прошел стадию плавления. Большинство метеоритов несут следы ударного воздействия при столкновении родительских тел друг с другом. Это воздействие сопровождается брекчированием, шоквым метаморфизмом и частичным плавлением, но при небольших размерах родительских тел ударное воздействие могло вызывать только локальный разогрев. Приведенные выше температуры метаморфизма указывают на то, что они достигались в протопланетных зародышах уже при сравнительно небольших их размерах, а не только на завершающей стадии аккумуляции планет.

При построении тепловой модели мы будем рассматривать только раннюю стадию аккумуляции планет, на которой их размеры не превысили первые сотни километров. Длительность ее, по разным данным, оценивается в  $10^6$ — $10^7$  лет [1, 8]. Температура тел на этом этапе определяется действием следующих факторов: температурой окружающей среды на заданном расстоянии от Солнца, энергией соударений с другими телами и частицами и нагреванием за счет распада короткоживущих радиоактивных изотопов. Вклад энергии, выделяющейся при соударении, который можно оценить по наиболее обоснованной модели Сафронова [2], на этом этапе еще мал [2, 4, 5]. Основной вклад обусловлен последним фактором. Из короткоживущих радиоактивных изотопов наибольший интерес представляет изотоп  $^{26}\text{Al}$  с периодом полураспада  $t = 7.38 \cdot 10^5$  лет и энергией распада  $2.99 \cdot 10^6$  эв. Достаточно надежная оценка содержания  $^{26}\text{Al}$  в родительском веществе метеоритов приведена в работе [11].

Для описания процесса роста планеты использована модель Сафронова [2], аппроксимирующая сложный процесс эволюции зародыша планеты в ходе многократных хаотических столкновений с конкурирующими телами и частицами из резервуара протопланетного облака на этапе аккумуляции, который описывается уравнением

$$\frac{dm}{dt} = 2(1 + 2\theta)r^2\omega\left(1 - \frac{m}{M}\right)\sigma_0, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi/\tau$  — угловая скорость орбитального движения планеты;  $\tau$  — период обращения, равный  $3.1 \cdot 10^7$  с;  $\sigma_0$  — поверхностная плотность вещества в зоне «питания» протопланеты, равная  $100 \text{ кг/м}^2$  [2];  $M$  — современная масса планеты;  $m$  — масса растущей планеты;  $\theta$  — статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания планеты»;  $r$  — радиус растущей планеты. Для оценки энергетического вклада, вносимого распадом короткоживущих изотопов ограничимся сферически-симметричной моделью. Конвективный теплоперенос и наличие зон плавления смеси учитывается параметрически, аналогично [5, 6], введением эффективных значений теплоемкости и теплопроводности:

$$c_{\text{эф.}} \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda_{\text{эф.}} \nabla T) + Q, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность тела, принятая равной  $3000 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_{\text{эф.}}$  — эффективная теплоемкость;  $\lambda_{\text{эф.}}$  — эффективная теплопроводность;  $Q$  — суммарная мощность внутренних источников тепла, обеспечиваемая распадом радиоактивных элементов и выделением энергии падающих тел. В центре тела задается отсутствие теплового потока.

Задача для уравнений (1)—(2) решалась численно для сферы увеличивающегося радиуса. Приращение радиуса  $\Delta R$  за один шаг по времени принимается постоянным. Размерное значение  $\Delta R$  принято равным  $1/20000$  от величины конечного радиуса тела. Шаг по времени в общем случае выбирается переменным и находится из (1) при выбранном распределении модельной плотности по принятому  $\Delta R$ . Положение зоны частичного плавления определяется из сопоставления вычисленного распределения температуры с температурой начала плавления при значении массы протопланеты на данном временном слое. Для дальнейших расчетов важна оценка концентрации изотопа  $^{26}\text{Al}$  в веществе протопланетного облака. В качестве наиболее обоснованного принято изотопное отношение  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \cdot 10^{-5}$  [11].

Прежде всего нас интересует максимальная оценка температуры в центре растущего зародыша в зависимости от его массы или от радиуса при различных возможных оценках концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в исходном веществе. Результаты расчета приведены в таблице. Из приведенных значений следует, что даже при весьма низких оценках средней концентрации алюминия возможные температуры в центре зародыша могут превышать  $1720 \text{ K}$  — температуру плавления железо-никелевого сплава. На рисунке приведены результаты расче-

та распределения температуры внутри протопланеты в зависимости от относительного расстояния от центра для трех различных значений радиуса тела. Из него следует, что уже при радиусе 250 км и содержании  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , равном 4.6 масс. %, температура плавления железо-никелевого сплава, который аккумулярировался вслед за минеральной ассоциацией, занимающей центральную часть родительского тела, достигается на половине радиуса растущей планеты. Возможно, что частично расплавленным окажется и часть следующего слоя, сложенного минеральной ассоциацией, состоящей из диопсида, форстерита, анортита и энстатита, которые конденсируются и аккумулярируются вслед за железом. В то же время внешняя оболочка тела останется твердой.

Радиус (км)	Температура в центре (К)			
	Концентрация $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %			
	1.0	3.0	4.6	9.0
50	1240	1701	1734	1825
100	1676	1752	1812	1978
150	1690	1793	1876	2104
200	1701	1828	1928	2206
250	1711	1856	1972	2290
300	1718	1878	2006	2359
400	1730	1912	2059	2461

С этого момента в процессе аккумуляции появляется ранее не анализировавшаяся особенность [12, 13]. При столкновении родительских тел, имеющих уже частично расплавленное алюмосиликатное ядро, полностью расплавленную железную среднюю часть и тонкую твердую внешнюю оболочку, реализуется кумулятивный эффект. Оболочки, состоящие из расплава, сливаются и образуют зародыш нового тела, ядро которого уже будет состоять из железо-никелевого сплава. При этом осколки твердой внешней оболочки могут частично теряться, так как масса тела еще недостаточна для их гравитационного удержания. Реализуется своеобразный механизм дифференциации вещества. Как следует из результатов, приведенных на рисунке, мощность внешней, хрупкой оболочки мала, поэтому эффективность слипания оказывается близкой к 1, что и предполагается в модели [2].

Таким образом, предлагаемый нами механизм формирования планет реализуется в два этапа. На первом этапе происходит образование большого числа родительских тел, размеры которых не превышают первые сотни километров. В процессе аккумуляции этих пер-

*Рис. 1.* Распределение температуры в зародыше растущей планеты. Радиус зародыша 400 км (1), 300 км (2) и 250 км (3)

вичных тел происходит их разогрев в результате распада короткоживущих радиоактивных изотопов и прежде всего  $^{26}\text{Al}$ . При столкновении друг с другом эти тела частично разрушаются, реализуется процесс дифференциации. Происходит сливание расплавленных оболочек, состоящих главным образом из железа родительских тел, и их бурный рост. Остатки холодных силикатных оболочек на этом этапе участвуют в аккумуляции менее эффективно. Второй этап наступает, когда массы новых, в основном железных, ядер зародышей оказываются способны удерживать преимущественно силикатные осколки, аккумулируя материал разрушенных родительских тел в планеты. Количественное описание этого процесса требует адаптации схемы (1)–(2), где такой процесс сепарации в явном виде не учитывается. Продолжительность второго этапа могла составлять  $10^6$ – $10^7$  лет. Такой вариант дает основание предполагать, что образование по крайней мере центральной части ядра и разделение Земли на оболочки произошло в начале второго этапа. При этом предложенная модель не исключает возможности продолжения процесса формирования ядра при дальнейшем росте планеты и после его завершения. Этот принципиально новый механизм дифференциации не требует

предположений о катастрофическом мегаимпакте, который привлекается для объяснения образования Луны и инициирования процесса формирования железного ядра Земли. Кроме того, в нашей модели достаточно просто решаются геохимические проблемы, которые обсуждаются в работе [7]. В частности, отделение свинца и разделения W-Nf системы в нашем варианте должно произойти в сравнительно мелких телах, формирующихся за время порядка  $1^7$  лет, что снимает трудности такого разделения при современных размерах ядра и мантии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 04-05-64508).

### Список литературы

1. *Дорофеева В. А., Макалкин А. Б.* Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: Едиториал, 2004.
2. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 6. С. 5.
3. *Витязев А. В., Печерникова Г. В., Сафронов В. С.* Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990.
4. *Хачай Ю. В.* Численное моделирование распределения начальной температуры в Земле // Ядерно-геофизические и геотермические исследования. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. С. 38.
5. *Kaula W. M.* Thermal evolution of Earth and Moon growing by planetesimal impacts // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. № 83. P. 999.
6. *Jacobsen S., Yin Q.* Models of planetary accretion and core formation based on the Hf-W clock. // Geophys. Research Abstracts. 2003. Vol. 5. 13884.
7. *Галлимов Э. М.* О происхождении вещества Луны // Геохимия. 2004. № 7. С. 691.
8. *Додд Р. Т.* Метеориты. Петрология и геохимия. М.: Мир, 1986.
9. *Войткевич Г. В.* Основы теории происхождения Земли. М.: Недра, 1979.
10. *Элерс Э.* Интерпретация фазовых диаграмм в геологии. М.: Мир, 1975.

11. *Nicolsjr R. H.* Short-lived radionuclides in meteorites: constraints on nebular timescales from the production of solids // *Space Science Rev.* 2000. Vol. 92. P. 113.
12. *Хачай Ю. В., Анфилогов В. Н.* Распределение температуры и дифференциация вещества Земли на стадии аккумуляции планеты // Третьи научные чтения Ю. П. Булашевича, 4–8 июля 2005 г.: Материалы. Екатеринбург, 2005. С. 102.
13. *Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В.* Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // *ДАН.* 2005. Т. 403. № 6. С. 803.

**Д. З. Вибе**  
Институт астрономии РАН

### ОТКУДА БЕРУТСЯ ЗВЕЗДЫ

В лекции рассматриваются современные представления о ранних стадиях процесса звездообразования.

This lecture contains a review of the current ideas on the earliest stages of the star formation process.

### До и после рождения звезд

Звезды зажигают.  
*В. Маяковский*

Звезды без малейшего преувеличения можно назвать фундаментальной структурной единицей Вселенной. Именно они в незапамятные времена пробудили любопытство человека к строению Космоса, наблюдение за звездами легло в основу календаря, звездные подсчеты позволили очертить контуры Галактики, звездные спектры убедили людей в единстве химического состава Вселенной. За 150 лет существования астрофизики мы накопили огромное количество наблюдательного материала о звездах, и теория звездной эволюции по праву считается одной из наиболее разработанных астрономических теорий.

---

© Д. З. Вибе, 2006

Обилие наблюдательной информации о звездах обусловлено тем, что звезды, во-первых, ярки; во-вторых, излучают в легком для исследований «видимом» диапазоне. К сожалению, весь этот объем информации не позволяет прояснить тайну рождения звезд. Выйдя на главную последовательность, звезда «забывает» обо всей своей предшествующей эволюции, и потому многие важные детали звездообразования все еще остаются загадкой. Трудность непосредственных наблюдений дозвездных и протозвездных объектов состоит в том, что энергетика процесса перехода газа в звезды, особенно начальных фаз, низка и излучение объектов приходится на субмиллиметровый диапазон. Только в последние годы появились достаточно чувствительные телескопы субмиллиметрового диапазона с хорошим пространственным и спектральным разрешением. Поэтому наши познания о «дотермоядерном» этапе эволюции звезд до сих пор в значительной степени неполны. Точнее, довольно хорошо и подробно разработана теория протозвездного этапа, начинающегося с утраты гравитационной устойчивости и заканчивающегося образованием звезды типа Т Тельца с околозвездным (протопланетным) диском. Однако до сих пор остается открытым вопрос об образовании гравитационно неустойчивых сгустков. В этой лекции я сосредоточусь именно на нем. Более детально современные представления о рождении звезд описаны в книгах [1]–[5].

## Жизненный цикл молекулярных облаков

Тучки небесные, вечные странники...  
Чужды вам страсти и чужды страдания.  
*М. Лермонтов*

Очевидно, что звезды в настоящую эпоху образуются из диффузного межзвездного вещества в результате его постепенного уплотнения, причем динамический диапазон плотностей очень велик, даже если принимать в расчет лишь самые ранние стадии образования звезд: от  $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  в горячей межоблачной фазе до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  и более в дозвездных ядрах. Основные компоненты межзвездной среды (МЗС) в Галактике по данным [6] перечислены в табл. 1 (нужно отметить, что все числа в этой таблице, особенно доля занимаемого объема  $f$ , весьма приблизительны).

Компоненты межзвездной среды постоянно обмениваются веществом. В значительной степени переход плотного и холодного молекулярного газа в более горячие фазы МЗС обусловлен процессами,

Таблица 1. Основные компоненты межзвездной среды

Компонент	$n$ , см <sup>-3</sup>	$T$ , К	$f$ , %	$M$ , млн $M_{\odot}$
Горячая межоблачная среда (корона)	0.003	10 <sup>6</sup>	50	–
Теплая нейтральная среда	0.5	8000	30	2.8
Теплая ионизованная среда	0.1	8000	25	1.0
Холодая нейтральная среда	50	80	1	2.2
Молекулярные облака	> 200	10	0.05	1.3

связанными с образованием и эволюцией звезд. Причины обратного перехода — образования молекулярных облаков из разреженного атомарного вещества — пока неясны. С одной стороны, концентрация молекулярного газа к спиральным рукавам заставляет предположить, что образование молекулярных облаков стимулируется прохождением спиральных волн. С другой стороны, молекулярные облака встречаются не только в рукавах, но и в межрукавном пространстве, и на больших галактических высотах. Поэтому высказываются предположения, что образование молекулярных облаков (в том числе гигантских) может вызываться и другими процессами, например паркерской неустойчивостью [7].

Внутри молекулярных облаков происходят дальнейшая конденсация вещества, образование плотных ядер, их фрагментация, заканчивающаяся в итоге образованием звезд. Энергия, выделяемая молодыми звездами (ветер, оболочки сверхновых), приводит к рассеянию газа, не успевшего поучаствовать в звездообразовании, — молекулярное облако исчезает. Эффективность звездообразования (отношение массы образовавшихся звезд к полной массе облака) в целом по типичному молекулярному облаку не превышает нескольких процентов, хотя в отдельных особо плотных сгустках может достигать десятков процентов (иначе было бы невозможно образование динамически устойчивых звездных группировок). В настоящее время есть как минимум две конкурирующие теории образования первичных дозвездных конденсаций в молекулярных облаках: «медленная» квазистатическая модель, в которой образование звезд управляется магнитным полем, и «быстрая» турбулентная модель (табл. 2).

Таблица 2. Две модели звездообразования

	Медленная	Быстрая
Временная шкала	$\sim 10^7$ лет ( $\approx \tau_{\text{AD}}$ )	$\sim 10^6$ лет ( $\approx \tau_{\text{ff}}$ )
Дозвездные ядра	Изначально магнитостатические, затем теряют поддержку магнитного поля из-за амбиполярной диффузии и коллапсируют в динамическом режиме	Изначально гравитационно неустойчивы, сразу коллапсируют в динамическом режиме
Кинематическая структура ядер	Субзвуковая	Сверхзвуковая
Взаимодействие ядер с магнитным полем	Сначала докритические, затем сверхкритические	Сверхкритические

## Медленное звездообразование

На протяжении многих лет низкая эффективность звездообразования считалась признаком того, что коллапс и фрагментация (или фрагментация и коллапс) молекулярных облаков сдерживаются магнитным полем. Облако не коллапсирует, если отношение его массы  $M$  к магнитному потоку  $\Phi$  оказывается ниже некоторого критического значения [8]. Такое облако называется докритическим. Если отношение  $M/\Phi$  превосходит критическое значение, магнитное поле не в силах противостоять коллапсу (облако называется сверхкритическим).

Согласно «медленному» сценарию молекулярное облако изначально устойчиво по отношению к коллапсу (является докритическим), однако со временем поддержка магнитного поля ослабевает в результате диффузии нейтральных частиц сквозь магнитное поле [9] (амбиполярной диффузии). Облако становится сверхкритическим и начинает сжиматься и фрагментировать на отдельные дозвездные ядра. В этом случае временная шкала звездообразования задается не динамическим временем (или временем свободного падения  $\tau_{\text{ff}}$ ) облака, а характерным временем амбиполярной диффузии  $\tau_{\text{AD}}$ , которое может на порядок превышать динамическое время. На возможность медленного квазистационарного звездообразования указывали и предполагаемые очень большие времена жизни гигантских молекулярных облаков, первоначальные оценки которых превышали  $10^8$  лет.

Однако последние данные о возрастах звезд в близких областях звездообразования указывают, что жизнь молекулярного облака не может длиться более 10 млн лет (хотя предшествующая фаза перехода из атомарного в молекулярное состояние может длиться сравнимое или даже более длительное время [10]). Поэтому в последние годы часто высказывается предположение о несостоятельности «медленной» модели, на смену которой должна прийти «быстрая» модель.

## Быстрое звездообразование

В этой динамичной картине молекулярные облака оказываются весьма короткоживущими объектами; как само формирование которых, так и последующая фрагментация с образованием дозвездных ядер управляются сверхзвуковой турбулентностью. Турбулентность, в частности, объясняет фрактальную структуру молекулярных об-

лаков [11] и известное соотношение между размером облака и дисперсией скоростей в нем [12]. Дозвездные (протозвездные) ядра появляются там, где столкновение турбулентных течений создает области столь высокой плотности, что они становятся гравитационно неустойчивыми. Коллапс таких ядер должен происходить в шкале времени свободного падения. Низкая эффективность звездообразования объясняется соответственно низкой эффективностью формирования гравитационно связанных сгустков в турбулентной среде. Магнитное поле определяющей роли в этом процессе не играет — сгустки изначально являются сверхкритическими.

Один из основных недостатков этой модели — отсутствие четкого понимания механизма возбуждения турбулентности. Численные расчеты показывают, что при отсутствии постоянной «подкачки» энергии турбулентность в молекулярных облаках должна затухать за время порядка динамического (то есть, примерно за 1 млн лет). Иными словами, если механизм поддержания турбулентности отсутствует, ограничение на время жизни звездообразующего молекулярного облака становится очень жестким.

### Дозвездные ядра

Не давай сомнительным наблюдениям мешать тебе наслаждаться хорошей теорией.

*Д. Остерброк*

Ключом к разделению моделей могут стать наблюдения индивидуальных плотных дозвездных (беззвездных) ядер, в отношении которых модели дают, вообще говоря, различные предсказания. Распределение плотности в тех ядрах, структуру которых удастся тем или иным способом определить, выглядит так, словно они находятся в состоянии, очень близком к (магнито)гидростатическому равновесию. Но численные расчеты показывают, что только по распределению плотности судить о состоянии плотного ядра нельзя. В моделях турбулентного звездообразования [13] многие плотные «ядра», образующиеся в результате столкновения турбулентных течений, обладают профилем плотности, который практически неотличим от гидростатического, хотя эти сгустки не являются устойчивыми. Однако распределение скоростей внутри беззвездных ядер также согласуется скорее с предположением о том, что они пребывают

в равновесии и потому должны быть довольно долгоживущими объектами [14], чем с предположением о том, что они образовались в турбулентной среде.

Против короткой шкалы образования дозвездных ядер (и молекулярных облаков) свидетельствует и их химический состав. Многие из них обладают так называемой «луковичной» молекулярной структурой: обилие ряда молекул ( $\text{CO}$ ,  $\text{CS}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) достигает максимума на некотором расстоянии от центра ядра, а в центре ядра имеет минимум, связанный, как показывают модели химической эволюции этих объектов, с переходом этих молекул из газовой фазы в ледяные мантии на поверхностях пылинок. К наблюдаемой луковичной структуре вымораживание молекул приводит лишь в ядрах, возраст которых превосходит 2–3 млн лет.

К сожалению, «медленная» модель с результатами наблюдений дозвездных ядер также согласуется неидеально. Согласно ей большую часть времени дозвездное ядро проводит на докритической стадии, т. е. на стадии, когда гравитационный коллапс ядра остановлен магнитным полем. Между тем практически во всех дозвездных ядрах, в которых удается измерить отношение  $M/\Phi$ , оно оказывается немного (примерно в 2 раза) сверхкритическим, словно поддержка магнитного поля уже утеряна (если вообще была) [15]. (Впрочем, нужно отметить, что все известные дозвездные ядра обладают заметной внутренней структурой, что ставит под вопрос законность применения к ним любых одно- или двухмерных моделей.)

С точки зрения сторонников «медленной» модели, наблюдаемое отсутствие докритических ядер связано с тем, что на этой стадии они не обладают достаточно значительным контрастом плотности, чтобы быть классифицированными в качестве дозвездных ядер [16]. Поэтому вполне логично, что мы начинаем различать дозвездные ядра лишь тогда, когда они начинают сжиматься, переходя из докритического в сверхкритический режим.

Не исключено, что решение проблемы лежит в объединении моделей. В такой синтетической теории выделение плотных областей в молекулярном облаке могло бы происходить в результате магнитогидродинамических турбулентных движений. При этом непосредственно после обособления некоторые сгустки и ядра могли бы оказываться докритическими, другие — сверхкритическими. В первых могут образовываться одиночные звезды, во вторых — звездные скопления и группы [17, 18]. Последний случай особенно интересен,

так как может иметь отношение к еще одной загадке звездообразования — проблеме образования массивных звезд (с массами более  $\sim 8 M_{\odot}$ ).

## Альтернативное звездообразование

Нэ так все это было. Совсем нэ так.

*Приписывается А. и Б. Стругацкими И. В. Сталину*

Если обобщить сказанное (и кое-что не сказанное) выше, то получится следующая картина. Звезды образуются в молекулярных облаках либо под воздействием магнитного поля, либо под воздействием турбулентности, которая возбуждается или дифференциальным вращением звездного диска, или прохождением спиральных ветвей, или вспышками сверхновых, или звездным ветром, молекулярными истечениями и пр. В любом случае важнейшую роль как в образовании молекулярных облаков, так и в образовании дозвездных ядер (и в их последующем превращении в звезды) играют процессы нагрева и охлаждения. Скорости нагрева и охлаждения, в свою очередь, определяются наличием тяжелых элементов — как в газовой фазе, так и в составе пылинок, а тяжелые элементы синтезируются в звездах. Иными словами, как общая современная картина образования звезд, так и многие ее частности существенным образом определяются тем, что в Галактике *уже* есть звезды: современное звездообразование является *саморегулируемым* и *самоподдерживающимся* процессом. Однако в некоторых случаях образование звезд может, по-видимому, происходить и по другим законам.

### Первые звезды

Очевидно, что совершенно иначе должно было происходить образование первых поколений звезд. Они рождались в протогалактиках, где не было ни спиральных ветвей, ни вспышек сверхновых, ни магнитного поля. Отсутствие тяжелых элементов лишало протогалактическую среду возможности эффективно отводить тепловую энергию, выделяющуюся при коллапсе первых звезд. Охлаждение могло происходить лишь в результате столкновительного возбуждения молекул водорода и последующего излучения энергии возбуждения. Это охлаждение малоэффективно, поэтому многие полагают, что первые звезды (население III) были очень массивными или даже сверхмассивными (порядка сотен  $M_{\odot}$ ). Однако детальные численные

расчеты образования первых звезд пока остаются противоречивыми, несмотря на бóльшую, чем в случае современного звездообразования, простоту задачи.

Наиболее детальный расчет эволюции первой протозвезды выполнен в работе [19]. Ее авторы провели численное моделирование аккумуляции газа в потенциальной яме темного вещества, где образуется космологический аналог молекулярного облака. В этих расчетах оказалось, что в таком облаке формируется всего одна протозвезда. Поскольку непосредственно до образования звезды эти расчеты довести не удалось, масса ее осталась неопределенной, но она заведомо превышает  $30 M_{\odot}$ . Впрочем, даже если звезды с нулевым содержанием тяжелых элементов образовывались по одной на «темное гало», они очень быстро взрывались как сверхновые и обеспечивали протогалактический газ необходимым минимумом тяжелых элементов, чтобы функция масс образующихся звезд приобрела привычную нам форму. Звезды в шаровых скоплениях по-прежнему рождались в отсутствие магнитного поля и динамического воздействия спиральной структуры, но баланс нагрева и охлаждения, видимо, имел уже характер, близкий к современному [20]. Наблюдаемая однородность содержания железа в звездах шаровых скоплений указывает и на вероятное наличие турбулентности (и турбулентного перемешивания).

### Звезды в ядрах галактик

Еще один компонент (помимо гало), в котором звездообразование должно было происходить в «необычном» режиме, это ядра нашей и других галактик. По крайней мере, в Млечном Пути и в Туманности Андромеды [21, 22] молодые массивные звезды обнаружены в непосредственной близости от центральной черной дыры (на расстоянии порядка сотен а. е.). Их небольшой возраст (около 10 млн лет) говорит о том, что у них не было времени, чтобы попасть в центр галактики. Мы, скорее всего, видим их там, где они образовались, хотя «стандартные» условия для образования звезд в окрестностях черных дыр отсутствуют. Высказывались предположения, что в центре Млечного Пути звезды появились в результате столкновения двух газопылевых облаков, падавших на черную дыру [23]. Однако маловероятно, что при возрасте Млечного Пути и М31 в 12 млрд лет в них именно сейчас (причем одновременно) появились околядерные группы молодых звезд, поэтому механизм их образования не может быть «одноразовым». Скорее всего, образование звезд в непосред-

ственных окрестностях массивного компактного объекта представляет собой не уникальное, а вполне обыденное явление. Но природа его пока остается невыясненной.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 04-02-16637 и НШ-162.2003.2.

### Список литературы

1. *Сурдин В. Г., Ламзин С. А.* Протозвезды. Где, как и из чего формируются звезды. М.: Наука, 1992. <http://www.astronet.ru/db/msg/1190949>
2. *Сурдин В. Г.* Рождение звезд. М.: УРСС, 2001.
3. *Smith M. D.* The origin of stars. Imperial College Press, 2004.
4. *Palla F., Stahler S. W.* The formation of stars. Wiley, 2004.
5. *Schulz N.* From dust to stars. Studies of the formation and early evolution of stars. Springer-Verlag, 2005.
6. *Tielens A.* The physics and chemistry of the interstellar medium. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
7. *Щекинов Ю. А., Зинченко И. И.* О происхождении гигантских молекулярных облаков // Астрон. журн. 2004. Т. 81, вып. 8. С. 694.
8. *Shu F. H., Adams F. C., Lizano S.* Star formation in molecular clouds: observation and theory // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1987. Vol. 25. P. 23.
9. *Mestel L., Spitzer L. Jr.* Star formation in magnetic dust clouds // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1956. Vol. 116. P. 503.
10. *Ballesteros-Paredes J.* Molecular clouds: formation and disruption // Astroph. Space Sci. 2004. Vol. 289. P. 243.
11. *Тараканов П. А.* Фрактальные структуры и неравновесные системы в астрофизике // Физика космоса: Тр 33-й Международ. студ. науч. конф., 3–7 февр. 2003 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003.
12. *Larson R. B.* Turbulence and star formation in molecular clouds // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1981. Vol. 194. P. 809.
13. *Ballesteros-Paredes J., Klessen R. S., Vázquez-Semadeni E.* Dynamic cores in hydrostatic disguise // Astrophys. J. 2003. Vol. 592. P. 188.

14. *Keto E., Field G.* Dark cloud cores and gravitational decoupling from turbulent flows // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 635. P. 1151.
15. *Crutcher R. M., Nutter D. J., Ward-Thompson D. et al.* SCUBA polarization measurements of the magnetic field strengths in the L183, L1544, and L43 prestellar cores // *Ibid.* 2004. Vol. 600. P. 279.
16. *Mouschovias T. Ch., Tassis K., Kunz M. W.* Observational constraints on the ages of molecular clouds and the star-formation timescale: ambipolar-diffusion-controlled or turbulence-induced star formation? // *Ibid.* В печати (astro-ph/0512043).
17. *Li Z.-Y., Nakamura F.* Magnetically regulated star formation in turbulent clouds // *Astrophys. J. Let.* 2004. Vol. 609. P. L83.
18. *Vázquez-Semadeni E., Kim J., Ballesteros-Paredes J.* Star formation efficiency in driven, supercritical, turbulent clouds // *Astrophys. J. Let.* 2005. Vol. 630. P. L49.
19. *Abel T., Bryan G. L., Norman M. L.* The formation of the first star in the Universe // *Science.* 2002. Vol. 295. P. 93.
20. *Bromm V., Larson R. B.* The first stars // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* 2004. Vol. 42. P. 79.
21. *Ghez A. M. et al.* Stellar orbits around the Galactic Center black hole // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 620. P. 744.
22. *Bender R., Kormendy J., Bower G., Green R. et al.* HST STIS spectroscopy of the triple nucleus of M31: two nested disks in keplerian rotation around a supermassive black hole // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 631. P. 280.
23. *Genzel R. et al.* // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 594. P. 812.

Я. В. Есина, Н. М. Кузьмин,  
В. В. Мусцовой, С. С. Храпов  
Волгоградский государственный университет

## ЭФФЕКТ РОССБИ И ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

### Введение

Волны и вихри Россби представляют собой сравнительно крупномасштабные возмущения во вращающихся газовых или жидких системах. Возможность существования данного класса волн обусловлена неоднородностью скорости вращения вдоль меридиана или по радиусу, если речь идет о тонких дисках, и возникающей из-за специфического распределения сил Кориолиса сдвиговой упругости среды. Характерной особенностью таких волн является то, что времена волновых движений превосходят период оборота системы. Поскольку подавляющее большинство астрофизических объектов обладают значительным угловым моментом и газовыми подсистемами, понятно, что рассматриваемый класс возмущений играет важную роль в их динамике и эволюции.

Несмотря на это, обсуждаемый класс возмущений чаще всего остается за рамками проводимых исследований.

В настоящей работе мы обсуждаем закон дисперсии волн на границе фотосферы и хромосферы Солнца с учетом эффектов, обусловленных его крупномасштабным вращением. Это направление представляется нам крайне перспективным, поскольку в антициклонических вихрях Россби из-за повышенной плотности вещество будет тонуть, а в циклонах, наоборот, всплывать. Примечательно, что это должно иметь место в средних широтах, где как раз и наблюдаются солнечные пятна. При этом погружение и всплытие вещества в погруженном в него магнитном поле должно, в принципе, приводить к нарушению режима Россби и соответственно к временному прекращению образования солнечных пятен. После некоторого периода релаксации процесс должен повторяться.

Прежде чем перейти к дальнейшему изложению, приведем несколько фактов, достоверно известных применительно к планетным

---

© Я. В. Есина, Н. М. Кузьмин, В. В. Мусцовой, С. С. Храпов, 2006

атмосферам и океанам [1–5] и существенных для нашего рассмотрения:

- полученное в рамках теории мелкой воды уравнение, описывающее дисперсию волн в атмосферах планет и океанах, во вращающейся вместе с планетой локальной декартовой системе координат имеет вид

$$\omega(\omega^2 - 4\Omega_z^2 - k_\perp^2 c_s^2) - \frac{2k_x \Omega_y}{R} c_s^2 = 0, \quad (1)$$

где  $\Omega_z$  — проекция скорости вращения системы на местную вертикаль;  $\Omega_y$  — проекция скорости вращения системы на меридиан;  $c_s$  — адиабатическая скорость звука;  $R$  — радиус планеты;  $k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2$ ,  $k_x$  — волновое число вдоль широты;  $k_y$  — вдоль меридиана. Высокочастотное решение этого уравнения ( $\omega \geq 2\Omega_z$ ) представляет собой закон дисперсии гравитационно-гироскопических волн, а низкочастотное — закон дисперсии волн Россби:

$$\omega_R = -\frac{2k_x \Omega_y}{R(k_\perp^2 + 4\Omega_z^2/c_s^2)}; \quad (2)$$

- вращение системы существенно влияет на динамику и свойства волновых структур, если выполняется так называемый режим Россби, а именно  $l_\perp \gg v/(2\Omega_z)$  или  $Ro = v/(2\Omega_z l_\perp) \ll 1$ , где  $l_\perp$  — масштаб структуры в плоскости, перпендикулярной местной вертикали;  $v$  — характерная скорость волновых движений;  $Ro$  — число Кибеля–Россби; поскольку движения в волне в любом случае дозвуковые, то достаточным для режима Россби условием служит  $l_\perp \geq r_R = c_s/(2\Omega_z)$ , где  $r_R$  — радиус Россби–Обухова;
- обусловленные силой Кориолиса и ее неоднородностью вдоль меридиана длинноволновые возмущения в нижних широтах представляют собой волны Россби (планетарные волны), на нелинейной стадии поддерживающие или создающие зональные (вдоль широты) течения, а в средних широтах — регулярно чередующиеся циклонические и антициклонические вихри Россби, ротор скорости которых параллелен или антипараллелен вектору локальной угловой скорости вращения системы соответственно — см. рис. 1 (можно сказать, что прослеживается качественная аналогия с известной задачей об электрическом дрейфе частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях (см., например, [6]) — экваториальные планетарные волны

*Рис. 1.* Примеры цепочки атмосферных циклонов над Арктикой (а) и Антарктикой (б): эквидистантные уровни изобарической поверхности в северном (а) и южном (б) полушариях (буквами *L* и *H* отмечены соответственно циклоны и антициклоны)

отвечают при этом движению по трахоиде без петель, а вихри Россби — по трахоиде с петлями; существует и строгая аналогия — с точностью до переобозначений параметров в законе дисперсии — с дрейфовыми волнами в замагниченной плазме, где температура электронов много больше температуры ионов [2]); другими характерными примерами циклонических и антициклонических вихрей Россби являются так называемые «баржи» в атмосфере Юпитера, являющееся автосоликоном Россби Большое Красное Пятно Юпитера и аналогичный автосоликон Нептуна;

- в циклонах сила Кориолиса направлена от центра вихря, поэтому в нем образуется понижение, а в антициклонах, наоборот, повышение плотности газа;
- антициклоны значительно более долгоживучи, чем циклоны, что связано с особенностями дисперсии (заметим, попутно, что из-за повышения плотности при прочих равных условиях суммарный угловой момент антициклона оказывается выше, чем у циклона, поэтому ему труднее распасться [5]);
- вихри Россби медленно дрейфуют вдоль параллели на запад со скоростью, не превышающей  $V_{dr} \simeq V_R$ , где  $V_R = \omega_R/k_{\perp}$  —

фазовая скорость волн Россби, определенная из линейного анализа — см. (2);

- наиболее интересный в прикладном смысле диапазон чисел Кибеля—Россби снизу ограничивается из соображений максимальной нелинейности режима, при которой частицы среды захватываются и дрейфуют вместе с волнами или вихрями:  $Ro > r_R/R$ , где  $R$  — радиус планеты;
- условия для режима Россби выполняются тем лучше, чем больше размер системы; его проявления на планетах-гигантах значительно ярче, чем в земных условиях.

### Актуальность исследования

Активность Солнца и, в частности, феномен солнечных пятен, привлекает внимание исследователей уже более века. Уже давно стало очевидным, что солнечные пятна образуются, когда всплывающее из нижних слоев на границу фотосферы и хромосферы вещество выносит вместе с собой мощный магнитный поток. Поскольку это вещество обжимается давлением окружающей плазмы, а магнитное поле и соответственно магнитное давление в нем больше, вклад термодинамического давления в полное в области пятна оказывается значительно меньшим, чем в соседних областях. Из-за малой сжимаемости среды это означает, что во всплывающем веществе температура значительно ниже температуры окружающей плазмы; как следствие, светимость в области пятна более низкая.

Хотя описанный сценарий не вызывает сомнений, непосредственные причины всплывания вещества до сих пор не ясны.

Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что пятна, как правило, наблюдаются в средних широтах. Кроме того, регулярность их появления и часто имеющая место пространственная квазипериодичность вдоль широты наводят на мысль о том, что за их формирование ответственны коллективные волновые процессы. Поиск, выявление и исследование таких процессов представляются крайне актуальными.

В настоящей работе мы проводим лишь первый, постановочный, этап исследования. В дальнейшем мы планируем показать принципиальную возможность развития волн и вихрей Россби на границе нижней хромосферы и верхней фотосферы Солнца в средних шירו-

тах и подробно исследовать закон дисперсии волн Россби малой амплитуды для значений параметров, характерных для границы нижней хромосферы и верхней фотосферы Солнца.

### Наблюдаемые особенности активных областей Солнца, позволяющие предположить их генетическую связь с волнами Россби

1. Локализация активных областей преимущественно в средних широтах.

2. Часто наблюдающаяся периодичность или квазипериодичность активных областей по меридиальной координате. При этом указанная периодичность зачастую совпадает с периодичностью циклон—антициклонной симметрии вихрей Россби в атмосфере Земли (см. рис. 1), например, шесть пятен или циклон-антициклонов соответственно вдоль широты.

3. Филаменты полутени солнечных пятен в ряде случаев имеют не радиальную структуру, а закручены по спирали, как и должно быть в циклонических вихрях.

4. Скорость дрейфа солнечных пятен вдоль меридиана сравнима с характерной скоростью дрейфа вихрей Россби:  $v_s \simeq v_R$ .

Действительно, применительно к Солнцу, но в пренебрежении эффектами, связанными с магнитным полем, из (2) можно получить

$$v_R = \frac{\omega_R}{k_{\perp}} = -\frac{2R_{\odot}\Omega \cos \Theta}{(k_{\perp}^2 R_{\odot}^2 + 4R_{\odot}^2 \Omega^2 \sin^2 \Theta / c_s^2)} \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  — угол между широтой (как географической линией) и вектором  $\mathbf{k}_{\perp}$ .

Основываясь на характерных для Солнца [7] значениях радиуса  $R_{\odot} \simeq 6.9599(7) \cdot 10^8$  м, адиабатической скорости звука  $c_s \leq 6$  км/с (что отвечает температурам, меньшим 6000 К) и угловой скорости вращения  $\Omega \simeq 2.865 \cdot 10^{-6}$  рад/с (период обращения 25.38 сут на широте  $\Theta \simeq 17^\circ$ ), определяем, что второе слагаемое в знаменателе очень мало, так как  $M^2 = R_{\odot}^2 \Omega^2 / c_s^2 \simeq 0.11$ . В то же время минимальное значение первого слагаемого (то есть если  $k_{\perp}$  перпендикулярно меридиану) не мало. В этом случае для возмущений, имеющих  $m$

длин волн вдоль широты, находим

$$k_{\perp} R_{\odot} = \frac{2\pi R_{\odot}}{2\pi R_{\odot} \cos \Theta} \frac{m}{m} > m, \quad (4)$$

соответственно для  $m \geq 6$  получаем  $k_{\perp}^2 R_{\odot}^2 \geq 36$ .

Таким образом, получаем приближение, выполняющееся с достаточно хорошей точностью:

$$v_R \simeq -\frac{2R_{\odot}\Omega \cos \Theta}{m^2} \cos \varphi. \quad (5)$$

Вместе с тем, по данным наблюдений (см., например, [8]), солнечные пятна смещаются на  $0.3 \div 0.6$  гелиоцентрических градуса в сутки, причем дрейф происходит преимущественно на запад. Следовательно, для скорости солнечных пятен, выраженной в м/с, справедлива оценка

$$v_s \simeq -\frac{(0.3 \div 0.6)}{360} \cdot \frac{2\pi R_{\odot} \cos \Theta}{24 \cdot 3600}. \quad (6)$$

Рассматривая отношение выражений (6) и (5) и принимая наблюдаемое значение  $m = 6$ , определяем  $v_s/v_R \simeq (0.38 \div 0.76)/\cos \varphi$ . Итак, обсуждаемые скорости достаточно близки в широком диапазоне углов  $\varphi \simeq 0^\circ \div 70^\circ$ .

Приведем, кроме того, еще некоторые оценки. Во-первых, определим радиус Россби–Обухова для не слишком низких широт:  $r_R = c_s/(2\Omega_z) \simeq (10^6 \div 10^7)$  км.

Для циклон-антициклонных структур,  $m$  раз укладываемых вдоль широты, поперечный масштаб циклонических вихрей оказывается равным  $l_{\perp} = 2\pi R_{\odot} \cos \Theta/(2m)$ , то есть в средних широтах достаточное условие существования режима Россби  $l_{\perp} \geq r_R$  хорошо выполняется для всех  $m \leq 10$ .

Далее, нелинейность существенна, если для числа Кибеля–Россби, равного

$$R_o = \frac{v}{2\Omega_z l_{\perp}} < \frac{c_s}{2\Omega_z l_{\perp}}, \quad (7)$$

выполняется

$$R_o > \frac{r_R}{R_{\odot}} = \frac{c_s}{2\Omega_z R_{\odot}}. \quad (8)$$

Сравнивая (7) и (8) с учетом выражения для  $l_{\perp}$ , определяем, что должно выполняться  $m/(\pi \cos \Theta) > 1$ , что справедливо для всех  $m \geq 3$ . То есть образование вихрей Россби в солнечных условиях вполне возможно.

Отметим, что в рассматриваемой нами задаче существование долгоживущих квазистационарных вихрей Россби вряд ли возможно из-за эффектов, обусловленных магнитным полем, например, магнитного динамо, развития тиринг-моды и т. д. Это хорошо согласуется с наблюдаемой квазипериодичностью (циклическостью) возникновения, развития и исчезновения активных областей, описанной в [8].

Как представляется, эта циклическость может быть достаточно адекватно объяснена в рамках следующего сценария:

1) во время спокойной фазы крупномасштабное магнитное поле Солнца близко к предложенной еще в позапрошлом столетии наиболее простой модели дипольного поля; при этом закон дисперсии допускает возникновение и нарастание по амплитуде МГД-волн Россби;

2) волны Россби нарастают до нелинейных амплитуд и формируют регулярную систему вихрей; вместе с тем первоначальное распределение поля сильно искажается из-за вращения плазмы в этих вихрях и всплывающих (тонущих) в них магнитных потоках;

3) магнитное динамо, взаимодействие всплывающих полей с полями вихрей и развитие тиринг-моды приводят к формированию иерархии пространственных масштабов структуры поля, то есть фактически к развитию магнитной турбулентности; в турбулентных возмущениях интенсивно диссипирует кинетическая энергия вихрей Россби, и они распадаются;

4) наступает спокойная фаза.

### Равновесная модель

В качестве равновесной будем использовать модификацию модели, предложенную в [9].

Рассмотрение проводим в локальной декартовой системе координат, вращающейся с угловой скоростью  $\boldsymbol{\Omega}$  (для простоты предполагаем, что вращение Солнца твердотельно), в которой действует эффективная плотность силы тяжести  $\mathbf{g}$ , такая, что выполняется

$$\mathbf{g} = \tilde{\mathbf{g}} + \nabla \frac{[\boldsymbol{\Omega}\mathbf{R}]^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\tilde{\mathbf{g}}$  — локальное гравитационное (без учета вращения) ускорение силы тяжести;  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор начала отсчета системы координат, проведенный из центра Солнца.

Пусть единичный орт  $\mathbf{e}_z$  параллелен результирующему (с учетом вращения) вектору силы тяжести  $\mathbf{g}$ , а индекс « $i$ » для равновесных

величин принимает значения « $ex$ » при  $z > 0$  (хромосфера), « $in$ » при  $z < 0$  (фотосфера). Единичный орт  $\mathbf{e}_y$  направим вдоль меридиана на север, а единичный орт  $\mathbf{e}_x$  — вдоль широтной линии на восток.

Термодинамические параметры газа (плазмы) фотосферы, то есть плотность, температуру и давление, обозначим как  $\rho_{in}$ ,  $T_{in}$  и  $P_{in}$  соответственно (для количественных расчетов ниже будем использовать численное значение  $T_{in} \simeq 6000$  К, а давление определять из уравнения состояния идеального газа:  $P_{in} = \rho_{in} c_{in}^2 / \gamma$ , где  $c_{in}^2 = \gamma R T_{in} / \mu$  — квадрат адиабатической скорости звука;  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\mu$  — молярная масса).

Уровень атмосферы, характеризуемый (снизу) указанными выше параметрами, примем за поверхность тангенциального разрыва с вертикальной координатой  $z = 0$ . Параметры верхней (или внешней) среды мы будем снабжать индексом « $ex$ », принимая для расчетов значение  $T_{ex} \simeq 10000 \div 20000$  К, а  $\rho_{ex}$  и  $P_{ex}$  определять из условия вертикального баланса сил на поверхности разрыва (см. ниже). Верхнюю среду также моделируем идеальным газом.

Следует отметить, что реально наблюдаемый переходный слой от фотосферы к средней хромосфере (то есть нижняя хромосфера) толщиной  $\simeq 2$  тыс. км характеризуется существенной неоднородностью и нестационарностью плотности, температуры и других параметров плазмы. Что касается плотности, то уверенно можно утверждать, что на указанном масштабе она меняется от  $\simeq 10^{-7}$  г/см<sup>3</sup> в фотосфере до  $\simeq 10^{-12}$  г/см<sup>3</sup> в средней хромосфере. Учитывая, однако, что вследствие развития неустойчивости Кельвина—Гельмгольца (НКГ) любой тангенциальный разрыв за конечное время размывается в турбулентный вихревой слой («vortex sheet»), а на указанной границе мелкомасштабная НКГ должна развиваться (см. [9]), мы будем предполагать наблюдаемую структуру переходного слоя обусловленной уже развившейся неустойчивостью, и в качестве исходной применять разрывную модель этого слоя. При этом разрыв мы, естественно, помещаем на некоторой промежуточной высоте в нижней хромосфере, где  $\rho_{in} \simeq 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>; перепад плотности на разрыве определяется из описанного ниже вертикального баланса сил.

Невозмущенную скорость течения газа в рассматриваемой локальной системе отсчета везде положим равной нулю.

Наиболее сложным оказывается вопрос о распределении магнитного поля. Самая простая, предложенная в позапрошлом веке модель

крупномасштабного постоянного дипольного поля

$$B_R = -\frac{2A}{R^3} \sin \Theta, \quad B_\Theta = \frac{A}{R^3} \cos \Theta, \quad (10)$$

$$|\mathbf{B}| = \frac{A}{R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \Theta}, \quad (11)$$

где  $R$  — текущий радиус в сферической системе координат;  $\Theta$  — широтный угол, отсчитываемый от экваториальной плоскости;  $A$  — постоянная, определяемая величиной магнитного момента (для простоты рассмотрения считалось, что географические и магнитные полюса совпадают), не отвечает данным наблюдений.

Выраженную структуру магнитные поля имеют в полярных областях ( $\Theta > 60^\circ$ ), интересующих нас в наименьшей степени, но и эти поля, по современным представлениям, в основном состоят из дрейфующих остатков активных областей, первоначально возникших в низких широтах [8].

Регулярное фотосферное поле отсутствует и состоит из мелких магнитных структур [7–8]. Это обусловлено тем, что под фотосферой расположена ковективная зона, в которой происходит интенсивное перемешивание в ячейках супергрануляции с характерным размером  $(2 \div 4) \cdot 10^4$  км, а сама фотосфера и нижняя хромосфера неустойчивы относительно широкого спектра нестационарностей [9] с различными пространственными масштабами  $l_B$  (гранулы —  $10^3$  км, спикулы —  $(1 \div 7)$  км) и малым временем жизни —  $\tau_B \simeq 10$  мин [7].

Вместе с тем магнитное давление должно играть существенную роль в вертикальном балансе сил, так как, согласно приведенным выше оценкам, в рассматриваемом нами тонком переходном слое от фотосферы к средней хромосфере термодинамическое (газовое) давление испытывает значительный скачок:

$$\frac{P_{ex}}{P_{in}} = \frac{\rho_{ex} T_{ex}}{\rho_{in} T_{in}} \simeq (1.67 \div 3.3) \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Наконец, отметим, что в указанном слое магнитное поле не может иметь вертикальной составляющей, так как это означало бы непрерывность магнитного поля и газового давления при переходе через слой [10]. Это, в свою очередь означает, что для горизонтального магнитного поля в хромосфере либо не выполняется фундаментальное уравнение  $\operatorname{div} \mathbf{B}_{ex} = 0$  (а это приведет к возникновению нефизической неустойчивости при решении задачи), либо это поле должно быть

однородно, что противоречит геометрии задачи в рассматриваемых достаточно крупных масштабах.

Таким образом, все магнитные поля будем считать мелкомасштабными, хаотичными, быстроосциллирующими, имеющими величину, но не имеющими направления (то есть их роль ограничивается исключительно вкладом в полное давление). Очевидно, что тангенциальный разрыв при  $z = 0$  вырождается при этом в контактный [10].

Интересующие нас волновые процессы очень длинноволновые  $\lambda_{\perp} \simeq R_{\odot}$  и медленные — с использованием (3) и оценки (4), определяем характерный период волны Россби:

$$T_R = \frac{2\pi}{\omega_R} = \frac{2\pi}{v_R k_{\perp}} \simeq \frac{\pi k_{\perp} R_{\odot}}{\Omega \cos \Theta \cos \varphi} \simeq \frac{\pi m}{\Omega \cos \Theta \cos \varphi} > \frac{\pi m}{\Omega} = \frac{m}{2} T_{\odot}, \quad (13)$$

где  $T_{\odot}$  — период оборота Солнца. Принимая значение  $m = 6$ , определяем, что  $T_R \simeq 76$  суток. Используя эти факты, проводим осреднение по временам  $\tau_B \ll t_0 \ll T_R$ . При этом, очевидно, получаем

$$\langle \mathbf{B}_i \rangle_{t_0} = 0, \quad B_i^2 = \langle \mathbf{B}_i^2 \rangle_{t_0}. \quad (14)$$

Обсудим далее вертикальный баланс давлений в выбранной модели. Ее стационарность обеспечивается выполнением условия

$$g = -\frac{1}{\rho_i} \frac{dP_i}{dz} - \frac{1}{8\pi\rho_i} \frac{dB_i^2}{dz} = -\frac{1}{\gamma} \frac{dc_i^2}{dz} - \frac{c_i^2}{\gamma} \frac{d \ln \rho_i}{dz} - \frac{1}{8\pi\rho_i} \frac{dB_i^2}{dz}, \quad (15)$$

где индекс « $i$ » принимает значения « $ex$ » или « $in$ ». Полагая атмосферу изотермической при  $z \neq 0$  (то есть  $c_i = const$ ), что достаточно хорошо согласуется с наблюдаемым распределением, и делая дополнительное предположение  $B_i^2(z)/\rho_i(z) = const$ , из (15) находим

$$g = -\left[ \frac{c_i^2}{\gamma} + \frac{B_i^2(0)}{8\pi\rho_i(0)} \right] \frac{d \ln \rho_i}{dz}, \quad (16)$$

откуда при  $g = const$  вытекает

$$\rho_i = \rho_i(0) \exp\left(-\frac{\gamma g z}{c_{i_0}^2}\right), \quad c_{i_0}^2 = c_i^2 + \frac{\gamma B_i^2(0)}{8\pi\rho_i(0)} = const. \quad (17)$$

Следует отметить, что конкретный вид  $z$ -распределений параметров среды в окрестности разрыва при условии их гладкости при

$z \neq 0$  и крупномасштабности не оказывает решающего влияния на закон дисперсии. Вместе с тем выбранная модель является, с одной стороны, достаточно реалистичной, а с другой стороны, позволяет получить аналитически закон дисперсии возмущений в явном виде.

При  $z = 0$  на контактном разрыве должна выполняться непрерывность полного (с учетом магнитного) давления:

$$P_{in}(0) + \frac{B_{in}^2(0)}{8\pi} = P_{ex}(0) + \frac{B_{ex}^2(0)}{8\pi}, \quad (18)$$

то есть  $c_{in_0}^2 \rho_{in}(0) = c_{ex_0}^2 \rho_{ex}(0)$ .

Поскольку интересующий нас класс возмущений достаточно крупномасштабен, определим в первом приближении изменения локальной угловой скорости вращения  $\Omega(\Theta)$  и квадрата магнитного поля  $B_i^2(\Theta)$  с широтой. За неимением более убедительных и достоверных данных примем, что величина поля описывается соотношением (11). Раскладывая в ряды с точностью до линейных по малым параметрам слагаемых, определяем соответственно

$$\begin{aligned} \Omega_z &= \Omega \sin \Theta \simeq \Omega \sin \Theta_0 + R(\Theta - \Theta_0) \Omega \frac{\cos \Theta_0}{R} = \\ &= \Omega_{z_0} + y \frac{\Omega_{y_0}}{R} = \Omega_{z_0} + f_{\Omega} y, \end{aligned} \quad (19)$$

$$B_{\Theta}^2 = B_0^2(1 + 3 \sin^2 \Theta_0) + R(\Theta - \Theta_0) \cdot 6B_0^2 \sin \Theta_0 \frac{\cos \Theta_0}{R} = B_{\Theta_0}^2 + f_{B} y. \quad (20)$$

Кроме того, как следует непосредственно из (18) и уравнения состояния, для стационарного баланса слоев при  $z = 0$  необходимо выполнение условия

$$\rho_{in} - \rho_{ex} \frac{c_{ex}^2}{c_{in}^2} = \frac{\gamma}{8\pi c_{in}^2} (B_{ex_0}^2 - B_{in_0}^2) (1 + 3 \sin^2 \Theta), \quad (21)$$

откуда, с учетом послыной изотермичности модели, однозначно следует

$$\rho_i = \rho_{i_0} (1 + 3 \sin^2 \Theta), \quad (22)$$

где  $\rho_{i_0}$  — плотность в « $i$ »-м слое на экваторе.

Таким образом, в первом приближении следует учитывать зависимость

$$\rho_i \simeq \rho_{i_0} (1 + 3 \sin^2 \Theta) + R(\Theta - \Theta_0) \cdot 6\rho_{i_0} \sin \Theta_0 \frac{\cos \Theta_0}{R} = \rho_i(0) + f_{\rho} y. \quad (23)$$

## Основные уравнения

Вообще говоря, исходной должна была бы являться система уравнений идеальной магнитной гидродинамики

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g} - \frac{1}{8\pi\rho}\nabla\mathbf{B}^2 + \frac{1}{4\pi\rho}(\mathbf{B}\nabla)\mathbf{B}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = (\mathbf{B}\nabla)\mathbf{V} - (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{B} - \mathbf{B} \operatorname{div} \mathbf{V}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)P = c_i^2 \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\rho \right], \quad (26)$$

дополненная уравнением состояния идеального газа  $\gamma P_i = c_i^2 \rho_i$ .

Однако, в силу сказанного в предыдущем пункте, понятно, что чуть ли не основной задачей в нашем исследовании становится ее корректное усреднение. Фактически речь идет о выделении слабого периодического сигнала на фоне сильного и скорее всего случайного шума. Решением таких задач занимаются в теории цифровой обработки сигналов (ЦОС). Осреднению системы МГД в описанных выше условиях с использованием аппарата ЦОС будет посвящена следующая часть нашей работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 04-02-96500).

## Список литературы

1. *Rossby C. G. et al.* // J. Mar. Res. 1939. Vol. 2. P. 38.
2. *Незлин М. В., Снежкин Е. Н.* Вихри Россби и спиральные структуры: Астрофизика и физика плазмы в опытах на мелкой воде. М.: Наука, 1990.
3. *Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика: В 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1984.
4. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана: В 2 т. М.: Мир, 1986.
5. *Кузьмин Н. М., Мовсесян Т. А., Мусцовой В. В. и др.* // Физика Космоса: Тр. 34-й Международ. студ. науч. конф., 31 янв. — 4 февр. 2005 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005.
6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М.: Наука, 1988.
7. *Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.* Физические величины: Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991.

8. Солнечная и солнечно-земная физика: Иллюстр. слов. терминов / Под ред. А. Бруцека, Ш. Дюрана. М.: Мир, 1980.
9. Мусцовой В. В., Соловьев А. А. // Астрон. журн. 1997. Т. 74, № 3. С. 254.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

**Н. Б. Железнов**  
Институт прикладной астрономии РАН

## АСТЕРОИДЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ

### Введение

Помимо девяти больших планет вокруг Солнца обращается бесчисленное количество астероидов (малых планет), комет и метеороидов, которые принято называть малыми телами Солнечной системы. В результате действия различных сил гравитационного и негравитационного происхождения их орбиты подвержены довольно быстрым по сравнению с возрастом Солнечной системы изменениям, что приводит к столкновению этих тел друг с другом, с большими планетами и их спутниками, выпадению малых тел на Солнце или выбросу их из Солнечной системы. Часть этих астероидов движутся по орбитам, сближающимся с земной.

Астероиды с перигельными расстояниями, меньшими или равными 1.3 а. е., принято называть астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). Исторически первым из астероидов с такой орбитой был открыт (433) Eros (1898 г.). В 1932 г. была открыта первая малая планета (1862) Apollo, орбита которой заходит внутрь орбиты Земли.

Размеры АСЗ варьируются от 41 км ((1036) Ganymed) до нескольких метров (1991 VG). В среднем они порядка от нескольких километров до нескольких сотен метров. Распределение тел по размеру в популяциях астероидов, метеоритных тел, комет может быть описано степенным законом (Morrisson, 1992b):

$$N = kD^b, \quad (1)$$

где  $N$  — число тел, больших заданного диаметра  $D$ ;  $k$  — некоторая константа. Показатель степени  $b$  для всей популяции астероидов меняется, и близок к значению  $-2.4$  для главного пояса.

Все АСЗ принято подразделять на несколько групп в зависимости от величины их перигельного или афельного расстояния и большой полуоси. Каждая такая группа именуется по имени астероида — ее характерного представителя.

**Астероиды типа Амура** ((1221) Amor). Перигельные расстояния  $q$  больше, чем афельное расстояние Земли ( $1.017 \text{ а. е.} < q \leq 1.3 \text{ а. е.}$ ). Астероиды этого типа могут приближаться к Земле извне, но не заходят внутрь орбиты Земли.

**Астероиды типа Аполлона** ((1862) Apollo). Перигельные расстояния меньше, чем афельное расстояние Земли; большие полуоси больше, чем у Земли ( $a > 1 \text{ а. е.}$ ,  $q \leq 1.017 \text{ а. е.}$ ). Астероиды этого типа могут проникать внутрь орбиты Земли.

**Астероиды типа Атона** ((2062) Aten). Большие полуоси меньше, чем у Земли; афельные расстояния больше перигельного расстояния Земли ( $a < 1 \text{ а. е.}$ ,  $Q \geq 0.983 \text{ а. е.}$ ). Орбиты астероидов этого типа лежат в основном внутри орбиты Земли и только в окрестности афелиев выходят за ее пределы.

По данным на декабрь 2005 г., число астероидов типа Атона составляет 317 объектов, Аполлонцев — 1829, а астероидов типа Амура — 1615.

Астероиды трех типов — Амура, Аполлона и Атона — иногда называют ААА-астероидами. Помимо этих трех типов АСЗ в Солнечной системе, безусловно, существует еще один тип астероидов, способных приближаться к орбите Земли. Речь идет об астероидах, орбиты которых целиком лежат в пределах земной орбиты. Их часто именуют X-астероидами. Подобные малые тела трудно обнаружить, поскольку они могут наблюдаться только в утреннее или вечернее время на элонгациях от Солнца, не превышающих  $90^\circ$ . Пока обнаружен только один достоверный представитель астероидов этого типа с  $a = 0.757 \text{ а. е.}$ ,  $e = 0.291$ ,  $Q = 0.927 \text{ а. е.}$  (MPEC N 8072, 2003 Feb. 13).

## Происхождение АСЗ

Движение АСЗ совершается в такой области пространства, где оно не может быть устойчивым на длительных интервалах времени, если только какие-либо особые механизмы не поддерживают эту устойчивость. Перигелии и узлы орбит астероидов на плоскости эклиптики постоянно изменяются под влиянием планетных возмущений. При этом долготы перигелиев, как правило, прогрессивно возрастают, а узлы орбит движутся попятным образом, совершая полные обороты за периоды от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч лет. В результате этих изменений орбиты большинства АСЗ периодически пересекаются с орбитами Марса, Земли и других планет. Вблизи эпох пересечения орбит возникает реальная угроза столкновения или тесного сближения астероида с большой планетой.

Характерные времена жизни АСЗ исчисляются от нескольких миллионов до десятков миллионов лет, что явно мало по сравнению со временем существования Солнечной системы. Поскольку популяция этих тел достаточно многочисленна в настоящее время, должен существовать постоянный источник (или источники), подпитывающий ее. Имеется много свидетельств в пользу того, чтобы считать пояс астероидов основным источником АСЗ.

Главный пояс астероидов — образование, имеющее сложную динамическую структуру. Эта структура в основном определяется силами, действующими на малые тела в этой области со стороны Солнца и больших планет. Особое влияние на поведение тел в поясе оказывают резонансные соотношения (соизмеримости) низких порядков ( $2/1$ ,  $3/1$ ,  $4/1$ ,  $5/2$ ,  $7/3$ ) между средними движениями астероидов и Юпитера. В области между 2.1—3.3 а. е. им соответствуют люки — более или менее широкие интервалы среднего движения, где малые планеты совсем отсутствуют или плотность их распределения заметным образом понижена (рис. 1). Образование люков связано с наличием хаотических зон в окрестности резонансов с Юпитером.

У внутреннего края главного пояса малых планет в окрестности значений большой полуоси  $a = 2.1$  а. е. доминирует вековой резонанс  $\nu_6$  (совпадение средних скоростей движений перигелиев орбит астероида и Сатурна). Его расположение в поясе слабо зависит от эксцентриситета, но сильно зависит от наклона орбит: при наклонах, меньших  $10^\circ$ , он проходит в окрестности 2.1 а. е. При больших значениях наклона область его действия смещается в сторону увеличения больших полуосей.

*Рис. 1.* Распределение малых планет в плоскости  $a, i$ . На фоне распределения четко выделяются люки вблизи значений большой полуоси 2.5 а. е. (897''), 2.82 а. е. (748''), 3.3 а. е. (598''). Тонкой сплошной линией показано расположение векового резонанса  $\nu_6$ , отделяющего планеты с большими наклонами от остальной части пояса

В хаотических зонах характер движения резко меняется в зависимости от небольших изменений начальных условий движения, вследствие чего движение становится трудно предсказуемым на длительных интервалах времени. Астероиды, попадающие в зону хаоса, испытывают нерегулярные колебания эксцентриситета, амплитуда которых может достигать больших значений, на характерных временах от нескольких десятков до нескольких сот тысяч лет. В результате из-за уменьшения перигельного расстояния  $q = a(1 - e)$  в периоды, когда эксцентриситет находится в окрестности максимальных значений, астероид приобретает возможность пересекать орбиту Марса. Под влиянием возмущений, испытываемых астероидом при сближениях с Марсом, он может перемещаться из одной зоны хаоса в другую. В итоге астероид приобретает возможность сближаться с Землей, Венерой и даже выпадать на Солнце, если его перигельное расстояние оказывается меньше радиуса последнего.

Вековой резонанс  $\nu_6$  является наиболее активным поставщиком астероидного материала в зону внутренних планет. Среднее время, необходимое для превращения астероида с орбитой в данной области в астероид, пересекающий орбиту Земли, составляет всего около 0.5 млн лет. В 80 % случаев развитие событий заканчивается выпадением астероида на Солнце, в 12 % случаев — выбросом астероида на гиперболическую орбиту в результате сближения с планетами, в особенности с Юпитером, и только примерно в 1 % случаев — столкновением с Землей (Morbidelli et al., 2002).

Исследование распределения кратеров на поверхности Луны и Земли свидетельствует об относительном постоянстве темпа бомбардировки этих тел астероидами, кометами и их обломками (Grieve and Shoemaker, 1994). Поэтому должны существовать потенциальные источники, обеспечивающие более или менее равномерный приток вещества в резонансные зоны, притом в нужном количестве.

Наиболее вероятным источником является эффект Ярковского. Суть его заключается в реактивном эффекте (эффекте отдачи), испытываемом нагретым телом в результате асимметричного переизлучения тепловой энергии. В расчетах влияния данного эффекта на движение астероида рассматривались суточная и сезонная составляющие эффекта (Bottke et al., 2002).

Как показывают расчеты, выполненные в различных предположениях относительно размеров тел, их теплопроводности и других параметров, эффект Ярковского может обеспечить изменение больших полуосей тел, движущихся в поясе астероидов, на величины порядка 0.1–0.01 а. е. за время существования этих тел до их полного разрушения в результате катастрофических столкновений (от нескольких миллионов до примерно 2 млрд лет в зависимости от размеров).

## Программы наблюдения АСЗ

В настоящее время большая часть всех наблюдений АСЗ и соответственно открытий новых объектов этого типа выполняется на нескольких обсерваториях США, работающих по программе «Space Guard», поддерживаемой НАСА. Программа предусматривает обнаружение до 2008 г. 90 % всех АСЗ с диаметрами, большими или равными 1 км (как известно, столкновение с такими астероидами грозит Земле глобальной катастрофой). Ниже приводится краткое описание программ, выполняемых на отдельных обсерваториях.

LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) осуществляется Лабораторией Линкольна в Сокорро, Нью-Мехико, в кооперации с ВВС США на базе 1-метрового телескопа. В октябре 1997 г. на телескопе была установлена большая матрица —  $1960 \times 2560$  пикселей. В октябре 1999 г. был подключен второй 1-метровый телескоп. Высокая квантовая эффективность ПЗС-матриц и относительно большая скорость обработки информации позволили LINEAR просматривать на небесной сфере каждую ночь большие области. В настоящее время LINEAR принадлежит большинство открытий АСЗ (<http://www.ll.mit.edu/LINEAR/>).

NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking). По соглашению Лаборатории реактивного движения (JPL, NASA) с ВВС США для наблюдений АСЗ используется 1-метровый телескоп, расположенный на Халеакале, Мауи, Гавайи (Haleakala, Maui, Hawaii). На телескопе установлена ПЗС-камера с матрицей размером  $4096 \times 4096$  пикселей, площадь поля составляет  $1.2 \times 1.6^\circ$ . В феврале 2000 г. программа была перенесена на 1.2-метровый телескоп. С апреля 2001 г. к наблюдениям АСЗ был подключен 1.2-метровый телескоп системы Шмидта обсерватории Маунт Паломар в Калифорнии. В рамках этой программы была разработана специальная система SkyMorph, которая осуществляет поиск наблюдений вновь открываемых АСЗ на ранее снятых кадрах. Такие наблюдения (если их удастся найти) позволяют улучшить первоначальную орбиту и не потерять объект в будущем (<http://neat.jpl.nasa.gov>).

Spacewatch — программа начата в 1984 г. на 0.9-метровом телескопе Спейсвотч (Spacewatch), установленном в 1962 г. на обсерватории Китт Пик, Аризона (Kitt Peak, Arizona). В течение 1989–1992 гг. наблюдения проводились на матрице в  $2048 \times 2048$  пикселей. В 1992 г. чувствительность ПЗС-матрицы была увеличена на 70 %. Телескоп покрывает примерно 200 квадратных градусов небесной сферы в течение одного месяца, предельная звездная величина составляет  $21^m$ . В 2001 г. начались наблюдения на модернизированном 1.8-метровом телескопе, снабженном системой для более быстрого сканирования небесной сферы (<http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>).

LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search). Наблюдения АСЗ по этой программе начались в 1993 г. на 0.6-метровом телескопе Шмидта. Предельная звездная величина составила  $19^m$ . Площадь поля —  $2.9 \times 2.9^\circ$  ([http://www.lowell.edu/users/elgb/loneos\\_disc.html](http://www.lowell.edu/users/elgb/loneos_disc.html)).

Catalina Sky Survey (CSS). Располагает 0.7-метровым телескопом Шмидта на Маунт Биглоу (Mt. Bigelow — 20 км севернее Тусона, Аризона) и 1.5-метровым телескопом вблизи Маунт Леммон (Mt. Lemmon) (<http://www.lpl.arizona.edu/css/>).

В отличие от оптических наблюдений, дающих положение астероида в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения, радиолокационные наблюдения (временная задержка и сдвиг частоты) определяют третью координату (или скорость ее изменения), которая перпендикулярна по направлению к первым двум координатам. Причем относительная ошибка радиолокационных наблюдений меньше, чем у обычных оптических наблюдений.

Добавление немногочисленных радарных наблюдений обеспечивает умеренное уточнение орбит астероидов, имеющих большую наблюдательную историю. В то же время для недавно открытых астероидов и наблюдавшихся лишь на короткой дуге орбиты радарные наблюдения обеспечивают радикальное уточнение орбиты и тем самым во много раз уменьшают ошибку прогноза движения астероида в будущем.

Кроме того, радарные наблюдения несут богатую информацию о размерах, форме, вращении и структуре поверхности астероидов. К настоящему времени радарные наблюдения выполнены примерно для ста АСЗ. Наибольшее число радарных наблюдений произведено в обсерваториях Аресибо (Пуэрто Рико) и Голдстоун (Калифорния) (Ostro et al., 2002).

## Физические свойства АСЗ

Изучение физических свойств астероидов затруднено вследствие их малых размеров. Основным источником наших знаний о физической природе астероидов является изучение их фотометрических, поляризационных и спектральных характеристик и интерпретация полученных данных на основе теоретических моделей и сравнение с лабораторными и метеоритными аналогами.

Основными характеристиками, получающимися в результате этих исследований, можно считать следующие величины: абсолютную звездную величину  $H$  в визуальной области  $V$  фотометрической системы  $UBV$ ,  $G$  — параметр наклона фазовой кривой, диаметр  $D$ , геометрическое альbedo поверхности  $p$ , сидерический период вращения  $P$ , наблюдаемую вариацию блеска астероида ( $Var$ ), его цветность,

задаваемую двумя величинами  $U - B$  и  $B - V$ , а также таксонометрический класс объекта.

С 1986 г. в «Эфемеридах малых планет» для вычислений видимой звездной величины астероидов в лучах  $V$  применяется полуэмпирическая формула, которая позволяет достаточно точно описать изменение блеска в диапазоне фазовых углов от  $0$  до  $120^\circ$  (Bowell et al., 1989). Формула имеет вид

$$V = H + 5 \lg(r\Delta) - 2.5 \lg[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2]. \quad (2)$$

В этой формуле  $H$  — абсолютная звездная величина астероида в лучах  $V$ ,  $r$  — расстояние от Солнца,  $\Delta$  — расстояние от Земли,  $G$  — так называемый параметр наклона,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — функции угла фазы, определяемые следующими выражениями:

$$\Phi_i = \exp \left\{ -A_i \left[ \tan(\beta/2)^{B_i} \right] \right\}, \quad i = 1, 2,$$

$$A_1 = 3.33, A_2 = 1.87, B_1 = 0.63, B_2 = 1.22.$$

Найденные для более чем сотни астероидов значения  $G$  варьируются в пределах от  $-0.12$  до  $+0.60$ . Для прочих астероидов значение  $G$  принимается равным  $+0.15$ .

Абсолютная звездная величина  $H$  — важная характеристика астероида, которая позволяет оценить его линейные размеры, если найдено или из каких-либо соображений принято значение альбедо. Это следует из формулы, которая связывает диаметр астероида, выраженный в километрах, его абсолютную звездную величину и геометрическое альбедо  $p$ :

$$\lg D = 3.122 - 0.5 \lg p - 0.2H. \quad (3)$$

Отметим, что область альбедо, занимаемая АСЗ, такая же, как и для главного пояса: от  $2\%$  (астероид 3552) до  $63\%$  (астероид 3103). Среднее значение альбедо принимается равным  $0.13$ .

Среди АСЗ, как и в главном поясе астероидов, имеется по крайней мере две группы астероидов с резко отличными оптическими свойствами поверхностных слоев. Бимодальность распределения альбедо показана на рис. 2, где приводится распределение АСЗ по таксонометрическим классам по Толену (Лупишко и Лупишко, 2001). Очередность классов на рисунке соответствует изменению альбедо астероидов слева направо от его наименьших значений до максимальных.

Рис. 2. Распределение АСЗ по таксонометрическим классам (в процентах)

Бросается в глаза преобладание *S*-астероидов с альбедо от 0.1 до 0.3. Астероиды данного типа состоят из пироксена, оливина и небольшого количества металлов. Вторая по численности группа, *C*-астероиды с альбедо от 0.04 до 0.09, состоит из филосиликатов и углистых хондритов.

Минералы оливин  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  и ортопироксен  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  — наиболее распространенные в метеоритах силикатные минералы, присутствующие в различных пропорциях в метеоритах почти всех типов. Обыкновенные хондриты, углистые хондриты, базальтовые и энстатитовые ахондриты, обриты — это различные типы каменных метеоритов. Хондриты отличаются от ахондритов составом и структурой. Характерной особенностью структуры хондритов являются содержащиеся в них округлые зерна вещества — хондры размером от долей миллиметра до долей сантиметра. По своему химическому составу хондриты гораздо ближе к химическому составу Солнца по сравнению с земной корой. Вероятно, хондриты не прошли через стадию химической дифференциации вещества, которая на Земле обеспечивалась процессами плавления, выветривания, отложения осадков и т. п.

Все классы астероидов можно сгруппировать в три суперкласса *C*, *S* и *M*. В табл. 1 приведены средние значения плотностей вещества суперклассов.

Масса и плотность астероида также являются его важными характеристиками. Поскольку энергия, выделяющаяся при столкновении тела с Землей, пропорциональна массе тела, получение оценки

Таблица 1. Результаты определения средних плотностей вещества суперклассов (г/см<sup>3</sup>)

Суперклассы	C	S	M
Таксономические классы по Толеу	C, D, P, T, B, G, F	S, K, Q, V, R, A, E	M
Плотность (Standish, 2000)	1.29±0.06	2.71±0.04	5.29±0.53
Плотность (Krasinsky et al., 2001)	1.38±0.02	2.71±0.02	5.32±0.07

массы является необходимым элементом оценивания величины опасности, представляемой тем или иным телом, находящимся на траектории столкновения с Землей.

В предположении, что астероид имеет сферическую форму, нетрудно вывести формулу

$$m = \frac{\pi}{6} D^3 \rho, \quad (4)$$

где  $m$  — масса;  $D$  — диаметр астероида;  $\rho$  — средняя плотность вещества астероида.

На практике три величины  $m$ ,  $D$  и  $\rho$  могут определяться как независимо друг от друга, так и с привлечением данных о двух других параметрах.

Способы получения оценки массы астероидов можно условно разделить на динамический и астрофизический (или физический).

Динамический метод основан на анализе отклонений, вызываемых притягивающей массой тела в движении других небесных тел (больших или малых планет, космических аппаратов). Эти отклонения могут быть найдены или из позиционных оптических или радиолокационных наблюдений возмущаемых тел, или из радиотехнических измерений движения космических аппаратов, проходящих в непосредственной близости от возмущающей массы.

Физический способ получения оценки массы состоит в вычислении массы по формуле (4), основываясь на знании средней плотности и диаметра. При определении средней плотности астероида используются его таксономический класс и плотности предполагаемых метеоритных аналогов.

Помимо вариации блеска, связанной с изменением расстояний от Солнца, Земли и угла фазы, все астероиды обнаруживают колеба-

ния блеска большей или меньшей амплитуды в большинстве случаев с периодами от нескольких часов до одних суток. Эти колебания блеска объясняются вращением астероидов. Вращение громадного большинства астероидов совершается вокруг оси наибольшего момента инерции, сохраняющей свое направление в пространстве.

Важно отметить, что существует граница угловой скорости вращения астероидов, равная примерно 11 оборотам в сутки (один оборот за 2.2 ч). К этой границе вплотную расположен ряд астероидов с диаметрами в интервале от одного до десяти километров. Для астероидов от 40 км и более граница отодвигается в сторону меньших угловых скоростей. Нет никакого сомнения в том, что существование верхней границы угловой скорости астероидов с диаметрами, большими 200 м, связано с достижением при достаточно большой скорости предела устойчивости — равенства силы тяжести и центробежной силы инерции на экваторе вращающегося тела.

Тем не менее имеется большой ряд астероидов с медленным и сложным характером вращения, период которого может достигать нескольких суток. Самый яркий пример — астероид (4179) Toutatis. Этот потенциально опасный астероид был открыт в 1989 г. Он интенсивно наблюдался с помощью оптических средств и радиолокаторов в периоды его сближений с Землей в 1992, 1996 и 2000 гг. С помощью радиолокационных наблюдений удалось определить весьма причудливую форму астероида и сложный характер его вращения.

Его ось вращения постоянно меняет свое направление как в теле астероида, так и относительно неподвижной системы координат. Кувыркания астероида могут быть приближенно описаны как вращение его тела вокруг длинной оси с периодом  $5.367 \pm 0.01$  суток и равномерной прецессией этой оси вокруг постоянного направления в пространстве — направления вектора момента количества движения астероида относительно его центра инерции — с периодом  $7.420 \pm 0.05$  суток. Такое вращение может возникнуть в результате нецентрального столкновения с другим телом, когда ось вращения астероида может быть выведена из состояния, когда она совпадает с наименьшей осью инерции.

Другое объяснение сложного и медленного вращения может быть связано с вынужденной прецессией оси вращения главного компонента под влиянием притяжения спутника. Например, как у (1220) Crocus.

## Квазиспутники Земли

У Земли есть только один естественный спутник — Луна, однако за последние годы было обнаружено несколько так называемых «квазилун» — астероидов-«компаньонов», движение по орбите которых синхронизировано с движением Земли по ее орбите вокруг Солнца. Некоторые из них даже способны время от времени становиться временными спутниками нашей планеты, накручивая вокруг нее широкие спирали.

В настоящее время такой квазилуной является астероид 2003 YN<sub>107</sub>, который обращается вокруг Солнца по орбите, почти совпадающей с земной. Его полный путь относительно Земли напоминает гигантскую подкову (рис. 3). При движении по такой орбите астероид периодически отстает от нас, а потом забегает вперед. Но время от времени этот астероид становится квазиспутником в полном смысле этого слова, когда он <наворачивает> витки спирали вокруг самой Земли. Очередная фаза началась в 1996 г. и продлится до 2006 г. Этот астероид, вероятно, представляет собой скопление обломков от столкновения какого-нибудь небесного тела с Луной.

*Рис. 3.* Подковообразная орбита квазиспутника Земли. На схеме показано, как подобная орбита связана с точками Лагранжа

Другой подобный объект — 2002 AA<sub>29</sub> — также описывает подковообразную траекторию возле земной орбиты, однако этот астероид не будет собственно квазиспутником в течение ближайших 500 лет. Этот объект впервые найден на снимках, полученных 9 января 2002 г. по программе LINEAR. Его размеры не превышают 100 м. Плоскость орбиты 2002 AA<sub>29</sub> наклонена к плоскости орбиты Земли примерно на 10°. Астероид каждые 95 лет сближается с Землей на минимальное расстояние — в 150 раз большее, чем расстояние от

Земли до Луны. Последний раз этот астероид приближался к Земле (на расстояние порядка 60 млн км) в январе 2003 г.

Вычисления показали, что астероид, вероятно, был квазиспутником приблизительно от 550 до 600 г. н. э. Очередная фаза квазиспутника произойдет только в 2575 г. В течение нескольких десятилетий астероид будет от Земли менее чем в 30 млн км. В ближайшую тысячу лет опасности столкновения этого астероида с Землей нет.

Отметим еще один, самый крупный астероид этого нового класса — (3753) Cruithne, открытый в 1986 г. То, что этот астероид является компаньоном Земли, выяснил в 1997 г. Пауль Вигерт (<http://www.astro.uwo.ca/wiegert/index.shtml>). Благоприятные условия для наблюдения с Земли этого квазиспутника с диаметром в 5 км наступят в XXII в. Каждые 385 лет астероид сближается с Землей, и ее гравитация изменяет большую полуось его орбиты от 0.997 до 1.003 а. е. или обратно. Большой эксцентриситет ( $e = 0.515$ ) и наклон ( $i = 20^\circ$ ) орбиты астероида под влиянием Солнца, Земли и других больших планет делает его орбиту неустойчивой. Расчеты показывают, что 2500 лет назад астероид (3753) Cruithne пересек орбиту Марса, а примерно через 6000 лет он должен пересечь орбиту Венеры. При этом вполне возможен переход под влиянием ее тяготения на новую орбиту и даже столкновение с планетой.

### Двойные АСЗ

К 2005 г. открыто 62 малые планеты, у которых обнаружены двойственность (примерно равные компоненты) или наличие спутника у главного компонента. Из них 24 двойных астероида (ДА) принадлежат классу астероидов, сближающихся с Землей (7 двойных астероидов — «амурцы», 5 — «атонцы» и 11 — «аполлонцы»).

Двойные АСЗ при оптических наблюдениях с Земли видны как точечные объекты. Однако динамические процессы внутри двойной системы (движение, вращение компонентов, их взаимные покрытия и затмения) оказывают влияние на кривую блеска, поэтому она может в этом случае являться перспективным источником информации. Помимо изучения световых кривых ДА открываются с помощью телескопов с адаптивной оптикой, телескопов космического базирования, космических аппаратов, при покрытии звезд астероидами. При сближении АСЗ с Землей очень эффективным средством обнаружения его двойственности являются радарные наблюдения.

На рис. 4 показано распределение двойных АСЗ по отношениям

радиусов компонентов ( $R_s/R_p$ ) и по отношениям расстояний между компонентами к радиусу главного компонента ( $a/R_p$ ). Такая кучность параметров связана, по-видимому, с эффектом наблюдательной селекции, когда обнаружение спутников с очень малыми размерами почти невозможно.

*Рис. 4.* Распределение двойных АСЗ по отношениям радиусов компонентов ( $R_s/R_p$ ) к отношениям расстояний между компонентами к радиусу главного компонента ( $a/R_p$ ) (<http://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoons/astsatgr1.html>)

По другим параметрам также наблюдаются примерно одинаковые значения. Например, размеры компонентов небольшие: диаметр главного компонента порядка километра, а спутник меньше в несколько раз. Расстояние между компонентами около 2–2.5 км, что характеризует двойной АСЗ как тесную гравитационно связанную систему. Период обращения тел — немногим менее суток, а период враще-

ния главного компонента — порядка 2–3 ч. Плотность компонентов всего лишь 1–2 г/см<sup>3</sup>, что свидетельствует, по всей видимости, об их рыхлой, пористой структуре («rubble pile»). Такая структура может говорить об ударном происхождении двойных АСЗ.

## Заключение

Изучение АСЗ имеет важное значение с точки зрения астероидно-кометной опасности. В настоящее время этой проблеме уделяется большое внимание во всем мире.

Среди АСЗ выделяют потенциально опасные астероиды. К ним относят все астероиды, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а. е., и абсолютная звездная величина которых не превышает 22.0. На январь 2006 г. обнаружено уже 774 таких объекта (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Unusual.html>).

Вероятность столкновения любого из этих астероидов с Землей ничтожно мала. Однако в силу большого числа этих объектов частота столкновений составляет примерно одно за миллион лет для астероидов с диаметром больше 1 км и одно — за сто лет для астероидов с диаметром порядка 50 м.

Наличие на Земле и на других планетах Солнечной системы и их спутниках большого числа кратеров свидетельствует о непрекращающемся процессе столкновений астероидов с Землей. Имеющиеся данные об уже открытых АСЗ показывают реальность этой угрозы и в наше время. Например, астероид (99942) Апофис 13 апреля 2029 г. диаметром в 300 м пролетит на расстоянии всего лишь в 32000 км от Земли и его скорее всего можно будет наблюдать даже невооруженным глазом.

Подробно с теоретическими аспектами астероидно-кометной опасности можно ознакомиться в двух отечественных изданиях: Медведев Ю. Д. и др., 1996; Виноградова Т. А. и др., 2003. На основе этих книг в 2004 г. на Международной зимней студенческой конференции «Физика космоса» была представлена обзорная лекция по этой теме (Железнов Н. Б. и др., 2004).

С другой стороны, изучение этих объектов в последние годы приобрело не только теоретическое, но и очень важное практическое значение. АСЗ все более активно рассматриваются как потенциальные источники металла и другого минерального сырья (железо, никель, магний, алюминий, вода, азот, углерод, кремний, кислород и

др.) в околоземном космическом пространстве. АСЗ могут не только разрушить жизнь на Земле, но и принести пользу ее обитателям — обеспечить их сырьевыми ресурсами, источниками энергии и др. Поэтому подобные тела заслуживают пристального внимания наблюдателей и теоретиков, аккуратного отслеживания изменения их орбит в будущем и изучения их физических свойств.

### Список литературы

1. *Виноградова Т. А., Железнов Н. Б., Кузнецов В. Б. и др.* Каталог потенциально опасных астероидов и комет. СПб.: ИПА РАН, 2003.
2. *Железнов Н. Б.* Астероидно-кометная опасность: современное состояние проблемы // Физика космоса: Тр 33-й Международ. студ. науч. конф., 2 — 6 февр. 2004 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2004.
3. *Лупишко Д. Ф., Лупишко Т. А.* Об источниках происхождения астероидов, сближающихся с Землей // Астрон. вестн. 2001. Т. 35. С. 250—256.
4. *Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Сокольский А. Г. и др.* Астероидно-кометная опасность. СПб.: ИПА РАН, 1996.
5. *Bottke W. F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D. P. et al.* The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids // In Asteroids III / Eds. W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel. Univ. of Ariz, 2002. P. 395—408.
6. *Morbidelli A., Bottke W. F., Jr., Froeschlé Ch. et al.* Origin and evolution of Near-Earth objects // In Asteroids III / Eds. W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel. Univ. of Ariz, 2002. P. 409—422.
7. *Ostro S. J., Hudson R. S., Benner A. M. et al.* Asteroid radar astronomy // In Asteroids III / Eds. W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R. Binzel. Univ. of Ariz, 2002. P. 151—168.

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА  
ОБЛАСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
МАССИВНЫХ ЗВЕЗД**

Обсуждается химическая дифференциация молекул в областях образования массивных звезд. Излучение CS здесь хорошо коррелирует с излучением пыли и, таким образом, является хорошим индикатором полной массы, в то время как распределение  $N_2H^+$  часто сильно отличается. Это противоположно их типичному поведению в ядрах малой массы. Радиальные профили плотности в массивных ядрах соответствуют «стандартной» модели звездообразования. Зависимость температуры от радиуса близка к ожидаемой для оптически тонкого облака с центральным источником нагрева. Дисперсия скоростей либо постоянна, либо уменьшается от центра к краю. Имеются указания на мелкомасштабную фрагментарность.

The chemical differentiation of molecules in regions of high mass star formation is discussed. Here the CS emission correlates well with the dust continuum emission and is therefore a good tracer of the total mass while the  $N_2H^+$  distribution is frequently very different. This is opposite to their typical behavior in low-mass cores. Radial density profiles in massive cores correspond to the «standard» model of star formation. The radial temperature dependence is close to the theoretically expected one for a centrally heated optically thin cloud. The velocity dispersion either remains constant or decreases from the core center to the edge. There are indications of small-scale clumpiness.

## Введение

Образование массивных звезд все еще вызывает много вопросов. Области образования таких звезд обычно выглядят значительно сложнее, чем те, где образуются звезды малой массы. Исследования их затруднены сравнительно большими расстояниями до этих объектов. Таким образом, детальное изучение структуры и кинематики

областей образования массивных звезд весьма актуально. Например, разные модели звездообразования предсказывают разные профили плотности и дисперсии скоростей. Важным вопросом является выбор надежных индикаторов физических параметров. Эффекты химической дифференциации молекул могут сильно исказить наблюдаемую картину.

## Химическая дифференциация молекул

Изображения областей звездообразования в линиях разных молекул часто сильно различаются. Эти различия могут вызываться разными причинами: эффектами насыщения линий, неравновесного возбуждения молекул и, наконец, химической дифференциацией молекул. В настоящее время установлено, что в центральной части темных холодных облаков относительное содержание многих молекул (в частности, CO, HCO<sup>+</sup> и CS) в газовой фазе понижено за счет их вымораживания на пылинках ([1]–[7]). Таким образом, эти молекулы не являются хорошими индикаторами плотных холодных областей. С другой стороны, вымораживания N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> обычно не наблюдается [2]. Долгое время считалось, что это обусловлено меньшей энергией связи с поверхностью пылинки у молекулы N<sub>2</sub> (которая является родительской для N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) по сравнению с CO. Однако недавние лабораторные результаты показывают, что эти энергии почти одинаковы [8], что делает отмеченные различия в поведении N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и других молекул несколько загадочными.

В теплых массивных облаках, где образуются звезды большой массы, тоже наблюдается химическая дифференциация молекул (например, [9, 10]), но ее характер и причины, как будет видно из дальнейшего, существенно отличаются от тех, которые имеют место в холодных облаках.

Полученные нами карты большого числа областей образования массивных звезд в линиях разных молекул (в основном CS и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> [11]–[13]) часто сильно различаются. Наблюдения излучения пыли показали, что практически во всех случаях имеется хорошая корреляция между излучением CS и пыли. В то же время распределение интенсивности излучения N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> во многих случаях резко отличается [14, 15]. Пример такого сравнения представлен на рис. 1.

Как видно из рис. 2, отношение интенсивностей излучения CS и пыли практически не меняется, в то время как отношение N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0)/пыль падает более чем на порядок в направлении пика излучения

*Рис. 1.* Карты облака G285.26-0.05 в линиях CS(5–4) и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) (контуры), наложенные на карту излучения пыли в континууме на волне 1.2 мм (полутон) [14]. Звездочка указывает положение точечного ИК-источника IRAS

пыли и CS (который совпадает с положением мощного ИК источника IRAS).

Как уже отмечалось, причины вариаций относительной интенсивности излучения молекул в принципе могут быть различны. Эффекты насыщения, видимо, не играют существенной роли, поскольку, как показано в [13], оптическая толщина в линиях N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) невелика, а в линиях CS(5–4) этих эффектов тоже не заметна. Можно пытаться объяснить наблюдения неравновесным возбуждением молекул. Например, ИК накачка вблизи мощных ИК-источников может приводить к переносу населенности с нижних уровней на верхние, усиливая линию CS(5–4) и ослабляя линию N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0). Однако оценки показывают, что этот эффект может быть существенен лишь на расстояниях < 0.1 пк от ИК-источника, что на порядок меньше размера областей, где наблюдается уменьшение относительной интенсивности излучения N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> [15]. Кроме того, численные расчеты показывают, что объяснить уменьшение этой относительной интенсивности на порядок и более только лишь эффектами возбуждения, видимо, невозможно. Таким образом, единственным приемлемым объяснением наблюдаемых вариаций является химическая дифференциация молекул.

Для исследования причин этой дифференциации нами, во-первых, изучены вариации кинетической температуры газа в этих объектах. Для этого проведены наблюдения метилацетилена, CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H, — моле-

*Рис. 2.* Отношения интенсивностей излучения CS(5–4)/пыль (слева) и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0)/пыль (справа) в зависимости от расстояния до пика излучения CS и пыли в G285.26-0.05 [15]

кулы типа симметричного волчка, которая является хорошим индикатором кинетической температуры при концентрациях газа  $n > 10^4 \text{ см}^{-3}$  [16]. В большинстве случаев не выявлено значительной разницы температур в направлении пиков излучения CS и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> [17]. Типичные температуры по этим данным составляют  $\sim 30\text{--}40 \text{ К}$ . Таким образом, наблюдаемую химическую дифференциацию нельзя объяснить вымораживанием молекул. Наблюдения изотопов CO в некоторых источниках и оценки содержания CO на этой основе также не дают оснований говорить о возможном вымораживании молекул.

Оценки плотности газа по наблюдениям нескольких переходов CS, а также метанола показывают, что плотности пиков CS обычно несколько выше, чем пиков N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, но не более чем на полпорядка величины (типичные значения  $n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ ). Как уже отмечалось, этого недостаточно, чтобы объяснить различия карт эффектами возбуждения.

Возможный вариант объяснения наблюдаемой химической дифференциации был предложен в работе [18], где предполагается, что вследствие высокой динамической активности коллапс в областях образования массивных звезд может происходить со скоростью, превышающей скорость свободного падения. Тогда высокие плотности газа достигаются прежде, чем молекулы, ответственные за разрушение N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, начнут вымораживаться. Соответственно относительное

содержание  $N_2H^+$  в центре будет падать, а содержание CS в этих условиях будет, наоборот, увеличиваться. Численные расчеты химических моделей подтверждают эти ожидания.

Вместе с тем надо отметить, что наличие такого ускоренного коллапса не имеет наблюдательных подтверждений и довольно сомнительно с теоретической точки зрения. Другое возможное объяснение может быть связано с реакцией диссоциативной рекомбинации  $N_2H^+$ . Ранее считалось, что эта реакция приводит в основном к образованию молекулярного азота, который, вступая в реакцию с  $H_3^+$ , снова дает  $N_2H^+$ . Однако недавно выяснилось, что основным продуктом этой реакции диссоциативной рекомбинации является NH [19]. Вероятно, это означает, что содержание  $N_2H^+$  может уменьшаться за счет этого механизма в областях повышенной ионизации, например вблизи молодых массивных звезд.

## Внутренняя структура и кинематика

### Радиальные профили плотности

Для исследования зависимости плотности от радиуса отбирались ядра, близкие по форме к сферическим. Теоретические модели обычно предсказывают степенную зависимость плотности от радиуса,  $n \propto r^{-\beta}$ . Интенсивность излучения такого облака в какой-то линии или в континууме будет зависеть от прицельного параметра в оптически тонком случае тоже по степенному закону с показателем  $\gamma \approx \beta - 1$  (если условия возбуждения и относительное содержание молекул постоянны по радиусу). В работе [13] распределение плотности по радиусу исследовалось по данным картирования в линии  $N_2H^+(1-0)$ . Было найдено, что  $\gamma \approx 1$ , что в случае справедливости указанных предположений о возбуждении и содержании молекул дает  $\beta \approx 2$ . Эти предположения, однако, недостаточно обоснованы, и более надежные результаты можно получить по данным об излучении пыли.

Пример анализа карт излучения пыли представлен на рис. 3. По этим данным  $\gamma \approx 1$  для сгустков с внутренними ИК-источниками и  $\gamma \approx 0.6$  для сгустков, в которых таких источников нет. Предполагая, что во втором случае сгустки изотермичны, а в первом температура зависит от радиуса по степенному закону с показателем  $-0.4$  (см. ниже), получим  $\beta \approx 1.6$  в обоих случаях.

*Рис. 3.* Пример зависимости интенсивности излучения пыли от прицельного параметра и аппроксимации ее сверткой степенной функции с гауссовой диаграммой направленности (слева), а также зависимость от радиуса оценок плотности, полученных в модели большого градиента скорости по данным наблюдений CS  $J = 2 - 1$  и  $J = 5 - 4$  (справа) [14]

Такая зависимость согласуется с результатами ряда других работ [20, 21] и соответствует «стандартной» модели звездообразования [22].

Необходимо отметить, что речь здесь шла о средней плотности, определяемой по полному числу молекул на луче зрения. В облаках должны быть неоднородности, плотность которых может быть значительно выше средней. Действительно, оценки плотности на основе анализа возбуждения молекул дают величины на 1–2 порядка выше средней плотности. Скорее всего, это указывает на фрагментарную структуру облаков, которая не разрешается в наблюдениях, проводимых на одиночных антеннах. Плотность фрагментов слабо зависит от радиуса, как можно видеть из рис. 3 (справа).

### **Радиальные профили температуры**

Задача о зависимости температуры пыли от радиуса вокруг звезды большой светимости в оптически тонком облаке легко решается. Эта зависимость описывается степенной функцией с показателем от  $-0.3$  до  $-0.4$  [23]. Поскольку при больших плотностях температуры пыли и газа близки, можно предполагать, что и температура газа будет меняться примерно таким же образом. В то же время наблю-

дательные результаты довольно противоречивы. Так, в работе [24] получена более крутая зависимость на основе сравнения данных наблюдений разных молекул и в то же время сделан вывод о том, что в области излучения  $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$  она почти постоянна.

Нами получены высококачественные карты излучения  $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$  в линиях  $J = 13 - 12$  с высоким угловым разрешением при помощи 30-м радиотелескопа IRAM (рис. 4). На основе анализа этих данных определена зависимость температуры от радиуса для нескольких сгустков [25]. Оказалось, что она близка к описанному выше теоретически ожидаемому закону.

*Рис. 4.* Распределение кинетической температуры в S140 по данным наблюдений  $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$   $J = 13 - 12$  на радиотелескопе IRAM-30m (слева) и зависимость этой температуры от прицельного параметра для основного сгустка (справа) [14]

#### **Зависимость дисперсии скоростей от радиуса**

Данные наших наблюдений CS и  $\text{N}_2\text{H}^+$  показывают, что дисперсия скоростей в плотных сгустках, где образуются массивные звезды, либо практически не зависит от радиуса, либо убывает от центра к краю облака [26, 27, 13]. Вероятно, это связано с повышенной динамической активностью в центре, включая дифференциальное вращение, сжатие и турбулентность. Стоит отметить, что в работе [28] найдена обратная зависимость дисперсии скоростей от радиуса на основе сравнения ширин линий и размеров областей излучения различных молекул. Причины этого расхождения пока неясны.

## Заключение

Исследования образования массивных звезд остаются одной из наиболее актуальных задач астрофизики. В частности, необходимы детальные исследования структуры и кинематики объектов, в которых образуются массивные звезды, с высоким пространственным разрешением, а также исследования массивных протозвезд на самых ранних этапах их эволюции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 03-02-16307 и 03-02-39016-ГФЕН).

## Список литературы

1. *Caselli P., Walmsley C. M., Tafalla M. et al.* CO Depletion in the Starless Cloud Core L1544 // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 523. P. L165.
2. *Caselli P., Walmsley C. M., Zucconi A., et al.* Molecular Ions in L1544. I. Kinematics // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 565. P. 331.
3. *Kramer C., Alves J., Lada C. J. et al.* Depletion of CO in a cold dense cloud core of IC 5146 // *Astron. Astrophys.* 1999. Vol. 342. P. 257.
4. *Willacy K., Langer W. D., Velusamy T.* Dust Emission and Molecular Depletion in L1498 // *Astrophys. J.* 1998. Vol. 507. P. L171.
5. *Jessop N. E., Ward-Thompson D.* The initial conditions of isolated star formation-IV. C<sup>18</sup>O observations and modelling of the pre-stellar core L1689B // *MNRAS.* 2001. Vol. 323. P. 1025.
6. *Tafalla M., Myers P. C., Caselli P., et al.* Systematic Molecular Differentiation in Starless Cores // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 569. P. 815.
7. *Bergin E. A., Ciardi D. R., Lada C. J. et al.* Molecular Excitation and Differential Gas-Phase Depletions in the IC 5146 Dark Cloud // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 557. P. 209.
8. *Öberg K. I., van Broekhuizen F., Fraser H. J., et al.* Competition between CO and N<sub>2</sub> Desorption from Interstellar Ices // *Ibid.* 2005. Vol. 621. P. L33.
9. *Ungerechts H., Bergin E. A., Goldsmith P. F. et al.* Chemical and Physical Gradients along the OMC-1 Ridge // *Ibid.* 1997. Vol. 482. P. 245

10. *Bergin E. A., Goldsmith P. F., Snell R. L. et al.* The Chemical Composition and Evolution of Giant Molecular Cloud Cores: A Comparison of Observation and Theory // *Ibid.* 1997. Vol. 482. P. 285.
11. *Zinchenko I., Mattila K., Toriseva M.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. II. CS  $J = 2 - 1$  survey of southern H<sub>2</sub>O masers in the longitude range  $l = 260^\circ - 310^\circ$  // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1995. Vol. 111. P. 95.
12. *Zinchenko I., Pirogov L., Toriseva M.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale // *Ibid.* 1998. Vol. 133. P. 337.
13. *Pirogov L., Zinchenko I., Caselli P. et al.* N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) survey of massive molecular cloud cores // *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 405. P. 639.
14. *Zinchenko I., Pirogov L., Caselli P., Johansson L. E. B. et al.* Physical and chemical structure of dense cores in regions of high mass star formation // *Massive star birth: A crossroads of Astrophysics, IAU Symp. Proc. of the IAU 227, Held 16–20 May, Italy/* Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 92 (astro-ph/0512610).
15. *Pirogov L., Zinchenko I., Caselli P. et al.* Chemical differentiations in regions of high mass star formation. I. CS, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> and dust in southern cores // *Astron. Astrophys.* 2006. Submitted.
16. *Bergin E. A., Goldsmith P. F., Snell R. L. et al.* CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H as a temperature probe in dense giant molecular cloud cores // *Astrophys. J.* 1994. Vol. 431. P. 674.
17. *Малафеев С. Ю., Зинченко И. И., Пирогов Л. Е. и др.* Исследование пространственных вариаций температуры в областях образования массивных звезд // *Письма в Астроном. журн.* 2005. Т. 31, С. 262.
18. *Lintott C. J., Viti S., Rawlings J. M. C. et al.* Molecular Abundance Ratios as a Tracer of Accelerated Collapse in Regions of High-Mass Star Formation // *Astrophys. J.* 2005. Vol. 620. P. 795.
19. *Geppert W. D., Thomas R., Semaniak J. et al.* Dissociative Recombination of N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>: Evidence for Fracture of the NN Bond // *Ibid.* 2004. Vol. 609. P. 459.

20. *Beuther H., Schilke P., Menten K. M. et al.* High-Mass Protostellar Candidates. II. Density Structure from Dust Continuum and CS Emission // *Ibid.* 2002. Vol. 566. P. 945.
21. *Mueller K. E., Shirley Y. L., Evans II N. J. et al.* The Physical Conditions for Massive Star Formation: Dust Continuum Maps and Modeling // *Astrophys. J. Suppl.* 2002. Vol. 143. P. 469.
22. *Shu F. H.* Self-similar collapse of isothermal spheres and star formation // *Astrophys. J.* 1977. Vol. 214. P. 488.
23. *Doty S. S., Leung C. M.* A critical evaluation of semianalytic methods in the study of centrally heated, unresolved, infrared sources // *Ibid.* 1994. Vol. 424. P. 729.
24. *Fontani F., Cesaroni R., Caselli P. et al.* The structure of molecular clumps around high-mass young stellar objects // *Astron. Astrophys.* 2002. Vol. 389. P. 603.
25. *Малафеев С. Ю.* Исследование пространственных вариаций температуры в областях образования массивных звезд // *Физика космоса: Тр. 34-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. С. 233.*
26. *Zinchenko I.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. III. Statistics of the core parameters // *Astron. Astrophys.* 1995. Vol. 303. P. 554.
27. *Lapinov A. V., Schilke P., Juvela M. et al.* Studies of dense cores in regions of massive star formation. VI. Multitransitional CS and CO observations of G 261.64-2.09, G 268.42-0.85, G 270.26+0.83 and G 301.12-0.20 // *Ibid.* 1998. Vol. 336. P. 1007.
28. *Caselli P., Myers P. C.* The Line Width-Size Relation in Massive Cloud Cores // *Astrophys. J.* 1995. Vol. 446. P. 665.

**В. Г. Клочкова<sup>1</sup>, В. Е. Панчук<sup>1,2</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН

<sup>2</sup>Ставропольский государственный университет

## **СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД НА 6-МЕТРОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА**

Предпринята попытка охарактеризовать технические аспекты спектроскопии звезд на БТА.

### **Первый этап**

6-метровый телескоп БТА создавался по идеям 60-х гг., поэтому первое поколение спектроскопической аппаратуры было ориентировано на фотографическую регистрацию спектров. Вся аппаратура была разработана и создана в Государственном оптическом институте (ГОИ) и Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО), астрономы САО принимали участие в составлении технических заданий, контролировали разработку приборов, заводскую приемку и проводили испытания на телескопе. Для спектроскопии звезд и туманностей предназначались три спектрографа: ОЗСП — основной звездный спектрограф [1], СП-161 — спектрограф со скрещенной дисперсией [2], СП-160 — спектрограф первичного фокуса [3], последний использовался и для исследования внегалактических источников. Спектрографы СП-161 и СП-160 предназначались для работы с усилителями яркости — электронно-оптическими преобразователями (ЭОП), но к началу работы БТА не было ЭОП отечественного производства с характеристиками, удовлетворяющими требованиям спектроскопии звезд (относительно высокое отношение сигнал/шум). Промышленностью был изготовлен также планетный спектрограф СП-124 [4], но он использовался вначале только для фотографической регистрации спектров звезд. Применение фотоэлектронных умножителей в схемах кросс-корреляционных спектрометров, начатое пионерскими работами [5] и [6], в том числе и на 5-м телескопе [7], было оценено у нас в стране гораздо позже [8] и

---

© В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, 2006

не получило своего развития на БТА. Не была реализована и дополнительная оптическая схема БТА, предназначенная для установки фурье-спектрометра [9]. В итоге спектрографы первого поколения, предназначенные для исследования звезд, оказались чисто фотографическими, что снижало конкурентоспособность крупнейшего телескопа мира по сравнению с четырьмя 4-метровыми телескопами (KPNO, СТЮ, СФНТ, ААТ), оснащаемыми в конце 70-х гг. современными светоприемниками. Методы предварительной обработки фотоэмульсий с целью повышения чувствительности также не получили широкого распространения на БТА. Вторым фактором, определяющим научную эффективность спектроскопии звезд, оказались неудачные попытки по созданию в САО устойчивой технологии оцифровки фотографических спектрограмм, открывающей путь методам цифровой фильтрации шумов фотографической эмульсии. Поэтому первое поколение спектроскопистов САО потратило много времени на ручную обработку регистрограмм спектров, записанных на серийных микрофотометрах.

Астрономы САО совместно с промышленностью предпринимали попытки усовершенствовать методы спектроскопии звезд путем внедрения современных светоприемников. Первой системой с минимальным числом каналов явился фотоэлектрический магнитометр с интерферометром Фабри-Перо, установленный на длиннофокусной камере ОЗСП [10]. Затем на базе серийного спектрографа UAGS [11] был создан одноканальный фотоэлектрический поляриметр с кристаллооптическим модулятором [12], применявшийся для измерений круговой и линейной поляризации в избранных участках спектра. На СП-124 эпизодически использовался дисектор [13]. В начале 80-х на этом же спектрографе в задачах спектроскопии звезд устойчиво заработал 512-канальный телевизионный счетчик фотонов — сканер БТА [14].

## Второй этап

С середины 80-х в САО широко использовались двумерные (512 × 512 каналов) телевизионные счетчики фотонов системы КВАНТ [15], разработанной во ВНИИТелевидения с учетом опыта создания сканера БТА. Эти счетчики также использовались на реконструированных спектрографах первого поколения: СП-161 [16] и ОЗСП [17]. Кроме того, была предпринята попытка создания непосредственно в обсерватории первого спектрографа скрещенной дисперсии [18].

В целом период применения фотоэлектронных вакуумных приборов на БТА (ФЭУ, ЭОП, телевизионная трубка) с точки зрения продуктивности спектроскопических исследований звезд можно охарактеризовать скорее как технологический, чем научный. Объясняется это двумя фундаментальными причинами: во-первых, для позиционных исследований спектров вакуумные приборы неоптимальны из-за нестабильной работы фокусирующих электронных систем (исключая одноканальные кросс-корреляционные методы); во-вторых, системы счета фотонов имели небольшой динамический диапазон и были непригодны для точных спектрофотометрических задач (измерение слабых спектральных деталей). Однако именно на спектрографах второго поколения астрономы создали цифровые методы работы со звездными спектрами [19, 20] и первые цифровые архивы [21] звездных спектров, полученных на БТА.

### Третий этап

Третье поколение спектральной аппаратуры БТА, используемой для исследований звезд с начала 90-х, базируется на применении матриц полупроводниковых приборов зарядовой связи (ПЗС). Начиная с приборов с поверхностным переносом заряда [22] большинство светоприемников с матрицами ПЗС изготовлено в САО и поддерживается разработчиками. В состав аппаратуры входят светосильный многомодовый эшелле-спектрограф «Рысь» [23], эшелле-спектрограф первичного фокуса PFES [24] и кварцевый эшелле-спектрограф НЭС [25, 26]. Используется также ОЗСП, реконструированный под применение крупногабаритных дифракционных решеток [27]. Разработан эшелле-спектрограф среднего разрешения [28]. Широко используются резатели изображения [29] и автоматическое устройство коррекции наведения и сопровождения объекта [30]. Разработаны комплексы программ обработки двумерных цифровых изображений спектров [31, 32]. Концепция спектральной аппаратуры третьего поколения предусматривает применение двухлучевых схем, высокоэффективных покрытий оптических поверхностей, стационарное размещение аппаратуры на телескопе, широкий набор вариантов наблюдений и возможность их поочередной модернизации [17].

Одним из очевидных недостатков оснащённости БТА на сегодняшний день является отсутствие приемников, позволяющих осуществлять скоростную спектроскопию. Тотальное оснащение спек-

троскопической аппаратуры матрицами ПЗС с характерным временем считывания кадра в десятки секунд не оставляет надежд на исследование быстропеременных объектов (поляры и пр.). Быстрых приемников сегодня на БТА нет, работы по внедрению диокона (линейка из 40 диодов, вмонтированная внутрь ЭОПа) завершились испытаниями на телескопе малого диаметра [33], сканер БТА выведен из эксплуатации, а спектроскопические эксперименты с координатно-чувствительными детекторами (КЧД) пока не завершились публикацией результатов.

Статистику использования методов спектроскопии звезд на БТА можно найти в работах [27, 34].

## Перспективы

Опыт наблюдений, разработки и эксплуатации спектральной аппаратуры, полученный на предыдущих этапах, позволяет оценить возможности дальнейшего развития отечественной техники спектроскопии звезд. Основными компонентами развития считаем: 1) разработку оптоволоконного спектрографа высокого разрешения для БТА при существенном увеличении площади светоприемника, 2) развитие методов цифровой обработки сигнала, 3) расширение спектрального диапазона исследований как в ближний ИК-диапазон, так и в заатмосферный УФ-диапазон.

## Благодарности

Работы по развитию методов спектроскопии звезд на БТА постоянно находились в поле внимания ведущих отечественных спектроскопистов и получали поддержку в соответствии с различными государственными программами. В последнее десятилетие существенная поддержка была оказана также Российским фондом фундаментальных исследований (при выполнении проектов 93-02-02958-а, 93-02-17196-а, 94-02-03280-б, 99-02-18339-а, 01-02-16093-а и 04-02-17564-а мы постоянно уделяли внимание совершенствованию методической базы исследований). Работа стала возможной в том числе и благодаря гранту Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (проект номер МК-874.2004.2).

Работы по созданию и поддержке архивов наблюдательных данных, полученных сотрудниками лаборатории астроспектроскопии, а также по созданию методов обработки звездных спектров поддержаны в рамках проектов 95-07-19306-в, 02-07-90245-в, 03-07-90045-в и 05-07-90087-в.

## Список литературы

1. *Васильев А. С., Евзеров А. М., Лобачев М. В. и др.* // Оптико-механ. промышленность. 1977. Вып. 2. С. 31.
2. *Зандин Н. Г., Гусев О. Н., Пейсахсон И. В.* // Там же. 1977а. Вып. 6. С. 20.
3. *Зандин Н. Г., Колесников А. Е., Пейсахсон И. В. и др.* // Там же. 1977б. Вып. 2. С. 34.
4. *Гусев О. Н., Зандин Н. Г., Лобачев М. В.* // Там же. 1976. Вып. 12. С. 63.
5. *Griffin R. F.* // *Astrophys. J.* 1967. Vol. 148. P. 465.
6. *Griffin R. F.* // *MNRAS.* 1969. Vol. 145. P. 163.
7. *Griffin R. Gunn J. E.* // *Astrophys. J.* 1974. Vol. 191. P. 545.
8. *Токовинин А. А.* // *Астрон. журн.* 1987. Т. 64. С. 196.
9. *Лобачев М. В., Якушнова Л. Е.* // *Изв. САО.* 1977. Т. 9. С. 99.
10. *Глаголевский Ю. В., Рылов В. С., Щеглов В. П., и др.* // *Новая техника в астрономии.* 1975. Вып. 5. С. 7.
11. *Universal-Astro-Gitter-Spectrograph: VEB Carl Zeiss Jena Catalog.* № 16-190/23-9.
12. *Штоль В. Г., Бычков В. Д., Викульев Н. А., и др.* // *Изв. САО.* 1985. Т. 19. С. 66.
13. *Алексеев Г. Н., Драбек С. В., Саморуков Г. С.* // *Изв. Крым. Астрофиз. Обсерватории.* 1983ю. Т. 67. С. 177.
14. *Балега И. И., Верещагина Р. Г., Маркелов С. В., и др.* // *Изв. САО.* 1979. Т. 11. С. 248.
15. *Афанасьев В. Л., Балега Ю. Ю., Грудзинский М. А., и др.* // *Техника средств связи. Сер. Техника телевидения.* 1987. Вып. 5. С. 13.
16. *Клочкова В. Г., Панчук В. Е.* // *Препринт САО.* 1991. №. 70.
17. *Клочкова В. Г., Панчук В. Е.* // *Изв. САО.* 1991. Т. 33. С. 3.
18. *Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Рядченко В. П.* // *Письма в Астроном. журн.* 1991. Т. 17. С. 645.
19. *Сомов Н. Н.* // *Изв. САО.* 1986. Т. 22. С. 73.
20. *Klochkova V. G., Galazutdinov G. A.* // *Preprint SAO.* 1991. №. 71.

21. *Копонов В. К., Раччик В. Е.* // Bull. SAO. 2000. Vol. 49. P. 110.
22. *Борисенко А. Н., Витковский В. В., Желенкова О. П., и др.* // Изв. САО. 1990. Т. 32. С. 157.
23. *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Найденов И. Д., и др.* // Препринт САО. 1999. №. 139.
24. *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Юшкин М. В., и др.* Препринт САО. 2001. №. 159.
25. *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Найденов И. Д.* // Препринт САО. 1999. №. 135.
26. *Панчук В. Е., Пискунов Н. Е., Клочкова В. Г., и др.* // Препринт САО. 2002. №. 169.
27. *Панчук В. Е.* // Препринт САО. 2001. №. 154.
28. *Монин Д. Н., Панчук В. Е.* // Препринт САО. 2001. №. 162.
29. *Панчук В. Е., Юшкин М. В., Найденов И. Д.* // Препринт САО. 2003. №. 179.
30. *Иванов А. А., Панчук В. Е., Шергин В. С.* // Препринт САО. 2001. №. 155.
31. *Галазутдинов Г. А.* // Препринт САО. 1992. №. 92.
32. *Юшкин М. В., Клочкова В. Г.* // Препринт САО. 2004. №. 206.
33. *Рылов В. С.* // Изв. САО. 1991. Т. 31. С. 165.
34. *Раччик В. Е.* // Bull. SAO. 1998. Vol. 44. P. 65.

А. И. Малышев<sup>1</sup>, Л. К. Малышева<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН  
<sup>2</sup> Астрономическая обсерватория УрГУ

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НА ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

На примере трех планет (Земля, Марс, Юпитер) показано, что возникновение предбиологических состояний представляет собой вполне обычное и естественное явление, определяемое образованием зон абиогенного углеводородного синтеза в развитии планетарных дегазационных процессов. Энергетика этого процесса определяется глубинным теплом планеты, тогда как гелиотрофный вектор биологической эволюции, свойственный нашей планете, в ряду приведенных примеров является скорее исключением, чем правилом. Моделирование развития процессов абиогенного синтеза в условиях перечисленных планет показывает, насколько многообразны могут быть процессы самоорганизации и саморазвития в природе даже в том случае, если рассматривать их для вполне конкретного и привычного класса природных веществ — углеводородных соединений.

### Введение

Поиск внеземной жизни и внеземного разума со времен зарождения астрономии является одной из основных задач исследования космического пространства, окружающего нашу планету [20]. При этом принципиальное значение имеет ответ на вопрос, что именно мы предполагаем обнаружить. Такие явления, как Жизнь и Разум, пока известны нам лишь как уникальные, возникшие однократно в конкретных условиях Земли. Это делает невозможными какие-либо эмпирические обобщения условий возникновения Жизни и вариантов ее эволюции для иных миров. В данной ситуации исследователи неизбежно оказываются на позиции поиска во внеземных условиях исключительно земных (или подобных земным) форм жизни. Возникает парадоксальная ситуация: пристально вглядываясь в окружающий Космос, Человечество на самом деле пытается лишь разглядеть

в нем «себя, горячо любимого». В этих условиях резко возрастает опасность, что Человечество может оказаться не готово к встрече ни с внеземными Формами Жизни, ни с внеземным Разумом. Даже столкнувшись, оно их может не заметить: в лучшем случае пройдет мимо, в худшем — растопчет или будет растоптано.

Немаловажное значение имеет и финансовая сторона проблемы. Материальное обеспечение исследований окружающего космического пространства становится все более затратным. При этом не всегда учитывается, что за абстрактными суммами денежных знаков стоят вполне конкретные (в том числе и не восполняемые) ресурсы нашей планеты. Все это ужесточает требования к эффективности космических исследований.

По нашему мнению, дать ответ на вопрос, что именно мы предполагаем обнаружить и тем самым повысить эффективность космических исследований, можно исходя из моделирования процессов образования предбиологических состояний в иных планетарных условиях. В свою очередь, ключевым моментом для подобного моделирования могут стать недавние разработки одного из авторов этой статьи о физико-химических условиях образования зон естественно-углеводородного синтеза [17, 18]. Эти разработки дают определенные основания считать, что возникновение предбиологических состояний на планетах Солнечной системы является закономерным следствием планетарных дегазационных процессов. Различия в физико-химических условиях протекания дегазационных процессов на разных планетах могут иметь однозначное соответствие как в различных условиях возникновения предбиологических состояний, так и в возможной ориентировке вектора последующей эволюции самоорганизующихся биоподобных систем. Рассмотрим модели образования предбиологических состояний на примере трех резко различающихся между собой планет нашей Солнечной системы — Земли, Марса и Юпитера.

## Земля

Как известно, существуют две группы взглядов на происхождение земных форм жизни. Первая из них соответствует представлениям о зарождении жизни непосредственно на Земле благодаря абиогенному синтезу сложных углеводородных соединений. Вторую группу взглядов представляют варианты концепции панспермии. Суть этой концепции заключается в том, что жизнь как таковая про-

сто рассматривается в качестве одного из фундаментальных свойств материи, и вопрос о «происхождении жизни» в рамках этой концепции оказывается неактуальным. Поэтому более подробно остановимся на первой группе взглядов.

В 20-е гг. А. И. Опарин и Дж. Холдейн экспериментально показали [15], что в растворах высокомолекулярных органических соединений могут возникать зоны повышенной их концентрации — коацерватные капли, которые в некотором смысле ведут себя подобно живым объектам: самопроизвольно растут, делятся и обмениваются веществом с окружающей их жидкостью через уплотненную поверхность раздела. По их сценарию, к возникновению жизни на Земле привела следующая последовательность процессов: абиогенный синтез органических соединений, их накопление в океане вплоть до образования насыщенного ими «питательного бульона» — формирование фазово-обособленных органических микросистем (коацерватов) — появление пробионтов, т. е. первичных протоорганизмов, — образование прокариот, простейших из известных живых организмов. Этот самый сценарий лежит в основе многих современных вариантов океанической концепции происхождения жизни (см., например, [37]).

Долгое время изложенные взгляды казались очень гипотетичными вследствие широко распространенного мнения об исключительно биогенном происхождении органических соединений. Однако в 1953 г. С. Миллер [28] воспроизвел в колбе газовый состав первичной атмосферы Земли (смесь  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ) и при помощи электрических разрядов, имитирующих грозы, синтезировал в ней ряд органических соединений, в том числе аминокислоты. В последующих исследованиях было установлено, что инициировать этот процесс могут не только искровые электрические разряды, но и другие виды энергии — тепловая, ультрафиолетовое излучение и т. д.

В 50—60-е гг. С. Фоксом, Р. Янгом и другими исследователями [18, 19, 21, 25, 35] была проведена серия фундаментальных экспериментов; согласно их данным, в широком диапазоне температур (от 70 до 1000°) легко синтезируются из неорганических и простых органических соединений аминокислоты, из них — белковые макромолекулы (безматричный синтез полипептидов), которые, в свою очередь, в результате процесса самосборки образуют фазово-обособленные протеиноидные микросферы, по размерам сопоставимые с простейшими бактериями. Позднее Л. М. Мухин с соавторами [13] установил наличие аминокислоты глицин в гидротермальных водах на Камчатке, а В. К. Мархинин разработал концепцию вулканического происхож-

дения предбиологических соединений и высказал предположение о вероятном возникновении жизни в горячих озерах вблизи вулканов. В 1981 г. Дж. Корлисс, Дж. Бэрсс и С. Гоффман опубликовали работу, в которой была изложена модель возникновения жизни в районе выходов гидротермальных источников на дне океанов.

С этими данными смыкались и результаты исследований из области микробиологии. Т. Д. Брок [23], изучая наземные горячие источники, впервые обнаружил термофильные формы бактерий, живущие при температуре выше 80 °С. Позднее [36, 32] была выделена группа архаичных бактерий, или архебактерий (*Archaeobacteria*), многие формы которых обитают в горячих источниках при температуре около точки кипения воды. К. Везе [33], обобщая данные по эволюции микроорганизмов, расположил данную группу в основании бактериального филогенетического дерева. В результате все прокариоты (бактерии, не имеющие обособленного ядра) разделились на две группы — архебактерий (*Archaea*) и эубактерий (*Bacteria*). В ходе дальнейших исследований выяснилось, что архебактерий и эубактерий являются параллельными ветвями, развившимися из общей гипотетической предковой формы — Прогенота [34]. Реконструирование главных характеристик Прогенота, проведенное К. Везе [33] на основе анализа тенденций изменчивости форм в нижней части эволюционного дерева бактериального мира, привело к вполне определенному выводу: наш общий предок существовал при температуре кипения воды, т. е. был гипертермофилом. С этим выводом полностью согласуется вариант филогенетического дерева бактериального мира, обоснованный К. Штеттером [31].

Обобщая все вышеперечисленные данные В. Н. Компаниченко [3] выступил с гипотезой возникновения жизни в глубинах гидротермальных систем. В соответствии с его концепцией процесс зарождения простейших живых организмов протекал поэтапно: абиогенный синтез органических соединений; самосборка макромолекул в микросферы; скачкообразная трансформация микросфер в пробионты — эмбриональные формы протожизни; развитие из пробионтных протозкосистем простейших экосистем гипертермофильных бактерий. По его мнению, сам акт перехода от неживой материи (микросферы) к живой (пробионты) осуществляется в сильно неравновесных, флуктуирующих условиях недр гидротермальных систем в результате спонтанной самоорганизации, приводящей к возникновению в трансформированных микросферах самоподдерживающихся динамических процессов и целостной организации.

Необходимо подчеркнуть, что во всех рассмотренных выше вариантах концепций возникновения земной жизни требуется (как необходимая предпосылка) существование зон повышенной концентрации примитивных углеводородных соединений (типа «питательного бульона» в теории А. И. Опарина). Наличие этих зон фактически постулируется на основании косвенных признаков. Так, В. Н. Компаниченко в построении своей концепции использует факты обнаружения разнообразных органических соединений (от метана до аминокислот) в водах современных горячих источников и в газовой-жидких включениях минералов гидротермального происхождения. Однако факт существования зон естественного (абиогенного) углеводородного синтеза в последние годы независимо от проблематики зарождения жизни получил обоснование в работах одного из авторов этой статьи [7, 8]. В этих работах было показано, что зоны естественного углеводородного синтеза в земных условиях возникают как результат физико-химической эволюции газовой фазы эндогенных флюидов в условиях температурного равновесия с вмещающими породами и, в частности, обуславливают образование крупных скоплений углеводородного сырья. Для данной работы представляет интерес тот факт, что положение зон абиогенного синтеза углеводородов имеет жесткую физико-химическую привязку по РТ-условиям, а следовательно, имеется возможность смоделировать варианты образования подобных зон для условий иных планет.

Абиогенный синтез углеводородов в земных условиях (рис. 1) протекает в зонах, которые можно назвать зонами сероводородной (точка С) и углекислотной (точка D) отгонки. В меньшей степени образование углеводородов происходит в промежутке между этими зонами (участок CD). Сероводородная и углекислотная зоны образования углеводородов отличаются друг от друга температурой (100.4 и 30.85 °С), давлением и соответственно вероятной глубиной залегания (3.2 км и 860 м). В сероводородной зоне происходит образование более тяжелых углеводородов и довольно значительное их заражение самородной серой — побочным продуктом реакций углеводородообразования в этой зоне. Какая из этих зон имеет ведущее значение, полностью зависит от того, насколько велика концентрация сероводорода непосредственно перед входом в зону сероводородной отгонки. При содержании  $H_2S$  менее 2 % образование углеводородов происходит исключительно в углекислотной зоне, так как образование сероводородной зоны в этом случае невозможно. При высоких концентрациях сероводорода, напротив, все более значительная

часть углекислоты поглощается в сероводородной зоне, тогда как углекислотная зона вырождается и ее значение падает.

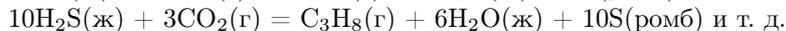
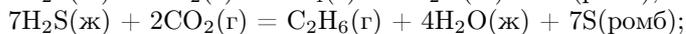
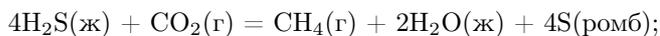
*Рис. 1.* Положение зон abiогенного углеводородного синтеза (показаны серым цветом) в земных условиях. Вероятная глубина соответствует 5-кратному литостатическому эквиваленту (пояснения в тексте)

Для перехода от общего флюидного давления к вероятной глубине при построении диаграммы (рис. 1) использованы данные [14] о в среднем 5-кратном превышении флюидным давлением его литостатического эквивалента. Это представляется вполне корректным, поскольку для перемещения флюидного потока требуется повышенный градиент давления, наиболее высокий в случае перемещения флюида путем молекулярной диффузии.

Область зон сероводородной отгонки связана с критической температурой сероводорода — 100.4 °С. В эту область движущийся по линии геотермического градиента (трасса А) флюид входит на вероятной глубине 3.2 км (точка С). В точке входа остаточное парциальное давление паров воды составляет всего 0.024 % от общего флюидного давления, паров диоксида серы 0.63 %. Поэтому в составе газовой фазы флюида доминируют двуокись углерода, водород и сероводород. Однако на входе в область зон сероводородной отгонки его содержание в газовой фазе скачкообразно уменьшается до уровня остаточного парциального давления, составляющего 2.06 % от общего флюидного давления, тогда как весь избыток сбрасывается в конденсат с образованием на пути газового потока области зон

сероводородной отгонки.

В этой области при фильтрации газообразной двуокиси углерода сквозь сероводородный конденсат происходит образование углеводородного сырья с одновременным образованием воды и самородной серы:

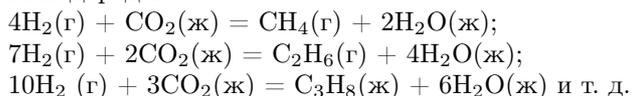


Образующиеся здесь сравнительно тяжелые простейшие углеводороды, начиная с бутана и бутилена, формируют углеводородный конденсат. Так как критические давления этих соединений относительно невелики [16], то их остаточные парциальные давления имеют очень низкий уровень. Повышенная температура и общее флюидное давление способствуют дальнейшим реакциям полимеризации углеводородов с образованием более тяжелых соединений. Более легкие углеводороды, такие, как метан, этан, этилен, пропан и пропилен, имея более низкие критические температуры, полностью остаются в газообразном состоянии. Фильтруясь через конденсат более тяжелых углеводородов, они частично поглощаются в ходе реакций полимеризации. Оставшаяся часть продолжает эволюцию в составе газовой фазы флюида.

Однако два последних из вышеперечисленных легких углеводородных соединений — пропан и пропилен — недалеко уходят по трассе эволюции флюида от места их первичного образования в зоне сероводородной отгонки. Пропан достигает своей критической температуры 96.67 °С почти сразу после зоны сероводородной отгонки — на вероятной глубине 3.06 км. При этом из-за его низкого критического давления в конденсат сбрасывается все количество пропана, превышающее равновесный уровень парциального давления 0.36 % от общего флюидного давления в данной точке. Чуть дальше по трассе флюида, на вероятной глубине 2.9 км, расположена зона отгонки пропилена, имеющего чуть более низкую критическую температуру. В этой зоне в конденсат сбрасывается весь избыточный пропилен, превышающий уровень парциального давления пропиленовых паров в 1.16 %. В этих зонах отгонки, как и в зоне сброса сероводорода, протекают реакции полимеризации углеводородов, в которые частично вовлекаются и фильтрующиеся сквозь конденсат легкие углеводородные соединения.

Последняя чрезвычайно важная зона на пути эволюции остаточных газов эндогенных флюидов расположена на вероятной глубине

около 860 м. Здесь достигается критическая температура 30.85 °С для двуокиси углерода. При входе в эту зону остаточные газы эндогенного флюида состоят в основном из CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и в меньшей степени из легких летучих углеводородов. Уровень давления остаточных паров воды в точке входа флюида в эту зону (точка D на диаграмме рис. 1) составляет лишь около 0.004 % от общего флюидного давления, давление остаточных паров SO<sub>2</sub> — 0.4 %, H<sub>2</sub>S — 1.9 %. На входе в зону давление паров CO<sub>2</sub> скачкообразно уменьшается до предельно возможного критического уровня, соответствующего в данной точке 6.2 % от общего флюидного давления. Весь избыток двуокиси углерода сбрасывается в конденсат, сквозь который происходит фильтрация водорода, сопровождающаяся образованием воды и углеводородов:



Образование углеводородов происходит и при фильтрации сквозь конденсат двуокиси углерода остаточного сероводорода. Но поскольку его содержание в остаточных газах не превышает 2 %, то общее количество образующейся при этом серы сравнительно невелико. Легкие углеводороды, фильтруясь сквозь углеводородный конденсат, частично поглощаются за счет реакций углеводородной полимеризации.

В том случае когда температура флюидного потока превышает температуру вмещающих пород (что вполне обычно для газогидротермальной деятельности), возможно образование зон абиогенного синтеза по периферии флюидного потока по мере снижения его температуры до соответствующих значений 100.4 °С и 30.85 °С. В субаэральных условиях эти зоны на поверхность, как правило, не выходят; исходя из критических давлений сероводорода и диоксида углерода (9.010 и 7.378 МПа соответственно) при условии 5-кратного превышения флюидным давлением его литостатического давления сброс этих соединений в конденсат на соответствующих изотермических поверхностях может происходить лишь на глубинах более 65 и 53 м соответственно.

По-иному складывается ситуация в субмаринных условиях. Здесь за счет гидростатического давления перекрывающей водной толщи зоны абиогенного углеводородного синтеза получают возможность выхода на поверхность океанического дна по периферии высокотемпературных гидротерм. Причем чем больше глубина дна океана, тем

более контрастно и активно работают зоны сероводородной и углекислотной отгонки и соответственно тем более активно протекает процесс абиогенного углеводородного синтеза в придонных отложениях. Эти процессы можно наблюдать в современных выходах высокотемпературных гидротерм на поверхность дна океана, где формируются образования так называемых «черных курильщиков», рудные постройки которых окружены по периферии скоплениями бактерий в виде так называемых «бактериальных матов».

Как следует из сказанного выше, положение о зонах естественного (абиогенного) углеводородного синтеза является необходимым и, можно сказать, объединяющим моментом как для океанического, так и для гидротермального вариантов гипотез о формировании жизни на Земле. Из температурного режима этих зон автоматически следует гипертермофильность первичных микроорганизмов, т. е. Прогенота. Как можно видеть из вышеприведенных формул, присутствие воды в реакциях абиогенного углеводородного синтеза является не столько его необходимым условием, сколько закономерным следствием образования углеводородов.

По существующим представлениям возраст нашей планеты составляет около 5 млрд лет, однако самые древние породы Земли, доступные непосредственному изучению, имеют возраст около 3.8 млрд лет. Поэтому весь более древний этап относится к догеологической стадии эволюции планеты. С позиций развития органической жизни на нашей планете последующую геологическую стадию принято разделять на два этапа: криптозой (этап скрытой жизни), соответствующий докембрию, и фанерозой (этап явной жизни), охватывающий палеозой, мезозой и кайнозой, вместе взятые. Переход от этапа скрытой жизни к этапу явной жизни произошел около 570 млн лет назад.

Таким образом, у Природы было не менее 2 млрд лет на эксперименты по созданию в зонах естественного углеводородного синтеза наиболее устойчивых органических соединений, способных к самоорганизации и дальнейшему развитию. Наличие единой среды миграции и распространения зарождающихся микроорганизмов — океана — в не малой степени способствовало закреплению возникшего Прогенота. В этом плане, на наш взгляд, концепции океанического зарождения жизни на нашей планете имеют определенное преимущество.

Если первичным источником энергии для Прогенота было тепло земных глубин, то вынос этих микроорганизмов флюидными струя-

ми из зон естественного углеводородного синтеза на дне океана или с малых глубин под поверхностью материков привел к адаптации их к питанию за счет энергии солнечного света. Другими словами, произошел переход от хемотрофного типа питания к гелиотрофному. Дальнейшая эволюция жизни на Земле привела к существенному разветвлению и усложнению цепей питания, однако в основе их по-прежнему лежит энергия солнечного света.

## Марс

Сила тяжести на поверхности Марса примерно в 2.6 раза меньше по сравнению с земной. На поверхность Марса падает вдвое меньше солнечной энергии. Это определяет его более низкие температуры. Средняя температура его поверхности составляет  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]. Давление атмосферы на поверхности Марса составляет от 0.005 до 0.01 доли земного. Возможность существования в древней истории Марса эпох с плотной атмосферой и более теплым климатом мы не рассматриваем, поскольку существуют более простые объяснения особенностей марсианского рельефообразования [9].

На поверхности Марса широко распространены вулканические структуры, нередко имеющие весьма внушительные размеры (плато Тарсис или вулкан Олимпус Монс). Это позволяет допустить, что на определенных этапах истории Марса активность его недр была не меньше, чем у современной Земли, а следовательно, позволяет предполагать, что Марс в эти моменты своей истории имел термический градиент, соответствующий современному земному. В этих условиях зоны естественного углеводородного синтеза располагались по периферии наиболее крупных вулканогенных структур. Для сравнения — в условиях Земли наиболее крупные нефтегазовые бассейны окаймляют либо области некогда высокой тектономагматической активности, либо материковые образования в целом, располагаясь на шельфе последних. Для Марса же плато Тарсис нередко рассматривают не только как планетарную вулканическую структуру, но и как протоматериковое образование.

Более низкие температуры поверхности и сила тяжести Марса приводят к тому, что зоны естественного углеводородного синтеза находились на больших глубинах даже в случае термического градиента, аналогичного современному земному (рис. 2). При этом зона сероводородной отгонки находилась на вероятной глубине около 5.3 км, углеводородной — на глубине около 3 км. Однако если учесть

*Рис. 2.* Положение зон абиогенного углеводородного синтеза для условий древнего Марса

гигантские размеры древних вулканических структур Марса, достигавших высот более 20 км, то можно считать, что зоны естественного углеводородного синтеза на Марсе в эти периоды располагались хотя и на глубине, но внутри разреза пород этих вулканических структур.

Большие глубины залегания зон естественного углеводородного синтеза снижают вероятность выноса зарождающихся примитивных хемотрофных микроорганизмов на поверхность планеты. Низкие температуры поверхности Марса резко снижают скорости протекания химических реакций в поверхностных условиях, а следовательно, препятствуют и процессам эволюционной адаптации микроорганизмов в этих условиях. В свою очередь, низкий уровень потока солнечной энергии на поверхность Марса понижает вероятность перехода от хемотрофного типа питания к гелиотрофному.

Последние данные марсоходов Opportunity и Spirit довольно убедительно показывают факт отсутствия в условиях древнего Марса сколь-либо крупных водоемов, по крайней мере в зоне посадки марсоходов. Об этом, в частности, свидетельствует обнаружение неизмененных оливинов. Повсеместно обнаруживаются лишь свидетельства воздействия вулканогенной (флюидно-эманационной) воды, тогда как о признаках бывшего существования озер, морей и океанов речь уже не идет. Однако даже в том случае, если бы на древнем

Марсе океаны все таки существовали, для существования зон углеводородного синтеза непосредственно на их дне из-за более низкой силы тяжести Марса требуется и пропорционально большая мощность перекрывающей водной толщи. Если для Земли выход зон естественного углеводородного синтеза непосредственно на поверхность океанического дна возможен на глубинах от 2 км, то для Марса подобное обнажение зон углеводородообразования могло бы иметь место для марсианских океанов глубиной более 5 км. Отсутствие подобных условий препятствует водному направлению эволюции марсианской жизни.

*Рис. 3.* Миграция зон абиогенного углеводородного синтеза в глубь остывающего Марса при его переходе в современное состояние

И наконец, следует отметить общую тенденцию к затуханию активности недр Марса, а следовательно, к снижению его температурного градиента. Существуют оценки [2], свидетельствующие о его сверхнизком современном значении, составляющем всего  $2^\circ/\text{км}$ . В этих условиях зоны естественного углеводородного синтеза постепенно отступают в глубь планеты по мере ее остывания (рис. 3). Следовательно, в отличие от земной жизни с ее выходом из зон зарождения и переходом от хемотрофного типа питания к гелиотрофному, для Марса наиболее вероятен иной вектор биологической эволюции: сохранение хемотрофного типа питания и смещение областей существования и эволюции марсианских микроорганизмов в глуби-

ны планеты вслед за отступающими в глубины планеты источниками энергии и питания.

Прямое обнаружение подобной марсианской жизни практически невозможно. Даже в том случае если жизнь на Марсе сейчас располагается на глубинах 6–10 км, бурение на такие глубины — довольно сложная задача даже в земных условиях. Тем не менее эта точка зрения вполне соответствует самой возможности обнаружения примитивных микроорганизмов в марсианских метеоритах, тогда как присутствие подобных микроорганизмов в считающихся марсианскими метеоритах в настоящее время является предметом оживленной научной дискуссии [1, 6]. Следует лишь учитывать, что из-за угасания Марса для его каменных бактерий наиболее вероятен переход в иной ритм времени, несопоставимо более медленный по сравнению с нашим человеческим восприятием. Обнаружив такую жизнь, мы можем даже не понять, что она по-прежнему живая.

## Юпитер

Эта планета для нас представляет наибольший интерес, поскольку именно на этой планете, как это ни парадоксально, есть вероятность существования наиболее крупного скопления биомассы в Солнечной системе. Для построения схемы углеводородного синтеза на этой планете воспользуемся данными, полученными в ходе спуска зонда Galileo Probe в атмосферу Юпитера [29]. Напомним, что спуск зонда был выполнен 7 декабря 1995 г. Он продолжался 57 мин. За условный нулевой уровень глубин в атмосфере исследователи приняли уровень, на котором давление атмосферы Юпитера достигло 1 атм при температуре 162 К. На 40-км высоте над этим уровнем давление атмосферы Юпитера составляло лишь 0.15 атм при 118 К, на высоте 20 км — 0.4 атм при 129 К. Ниже нулевого уровня на глубине 30 км давление достигло 5 атм при температуре 255 К, на глубине 60 км при температуре 425 К и давлении 23 атм зонд прекратил свое существование.

Эти данные дают вполне определенный РТ-профиль верхней атмосферы Юпитера. Причем, в отличие от Земли и Марса, для определения положения зон абιοгенного углеводородного синтеза в ат-

мосфере Юпитера нет необходимости прибегать к таким вспомогательным характеристикам, как термический градиент и вероятная глубина.

В верхней атмосфере Юпитера наряду с водородом и гелием присутствуют интересующие нас сероводород [24] и диоксид углерода [27], а также легкие углеводороды [30, 22]. Область зон естественного углеводородного синтеза для условий Юпитера, если судить по РТ-профилю трассы снижения зонда, располагается в верхней части его атмосферы на глубинах ориентировочно от 30 до 15 км ниже условного нулевого уровня (рис. 4). Любой сколь-нибудь существенный вынос из нижних слоев атмосферы легких газовых соединений ведет к сбросу в конденсат избыточных количеств сероводорода и углекислоты с одновременным протеканием реакций естественного углеводородного синтеза.

*Рис. 4.* Положение зон абиогенного углеводородного синтеза и эволюция углеводородного конденсата в условиях атмосферы Юпитера. Линия, маркированная треугольниками,— РТ-профиль атмосферы Юпитера, полученный зондом КА Galileo (пояснения в тексте)

Однако область абиогенного синтеза углеводородов в условиях Юпитера имеет определенную специфику. Зоны образования сероводородного и углекислотного конденсата здесь практически совпадают по РТ-условиям и расположены в верхней части атмосферы в условиях низких температур. Поскольку конденсат сероводо-

рода оказывается в кристаллическом состоянии при температурах ниже  $-85.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а конденсат диоксида углерода — при температурах ниже  $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то при более низких температурах они образуют совместную изморозь и взаимодействуют друг с другом в твердой фазе. Активирование реакций происходит под воздействием высокоэнергетических космических частиц и фотонов [26]. Направленность реакций в сторону образования углеводородов обусловлена фазовой гетерогенностью образующихся веществ: кроме взаимодействующих диоксида углеводорода и сероводорода в кристаллическом состоянии оказываются образующиеся вода и сера, тогда как углеводороды образуются либо в виде газа (метан, этан и т. п.), либо в виде жидкого конденсата (пропан и более тяжелые углеводороды). Гетерогенность протекания реакций, а следовательно и их направленность в сторону образования углеводородов, сохраняется и при температурах выше  $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этом случае наряду с жидкими реагентами ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ ) и продуктами реакции (углеводороды) в конденсате образуются кристаллический лед и самородная сера.

В то же время образовавшийся конденсат под воздействием силы тяжести Юпитера начинает осаждаться в более глубокие слои атмосферы. При достижении предельных значений температур для углекислоты и сероводорода все количество этих соединений, не прореагировавшее в ходе углеводородного синтеза, будет переведено в газообразную форму, вынесено в верхние слои атмосферы, где вновь будет сброшено в конденсат зон углеводородного синтеза, а затем вновь начнет осаждаться. Этот рециклинговый процесс будет повторяться вновь и вновь до тех пор, пока будут сохраняться сколь-нибудь существенные количества углекислоты и (или) сероводорода. Поэтому общий выход углеводородов (скорее всего довольно низкий при реакциях в твердой фазе) в единичном цикле значения не имеет. Важна общая направленность процесса и его бесконечная повторяемость.

При температурах, превышающих предельные значения для существования конденсата диоксида углерода и сероводорода (в более глубоких областях атмосферы), в составе конденсата кроме углеводородов остается лишь вода (сначала кристаллическая, затем жидкая при температурах выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и сера, переходящая в расплавленное состояние в зависимости от модификации при температурах  $112.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (?-сера) и  $119.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (?-сера). Еще глубже, при температурах,

превышающих критическое значение для воды (374.15 °C) в составе конденсата остаются лишь углеводороды и расплав самородной серы.

Однако и сами образовавшиеся углеводородные соединения подвергаются жесткому гравитационно-химическому естественному отбору. Если взять, например, ряд предельных углеводородов, то критическая температура этих соединений резко возрастает с усложнением их структуры: для метана она составляет всего 190.6 К, но уже для этана — 305.45 К, для декана — 619.5 К, а для нонадекана — 760 К (границы возможного существования конденсата и критические точки для некоторых соединений ряда предельных углеводородов показаны на рис. 4 серым цветом). Таким образом, право максимально долго просуществовать в конденсированном состоянии приобретают наиболее сложные углеводородные соединения. Переход в газообразное состояние для этих соединений равносильен смерти: они вовлекаются в круговорот газовых реакций, разрушаются, распадаясь под воздействием высоких температур на более легкие соединения. Последние вновь выносятся в верхние слои атмосферы и оказываются в зонах углеводородного синтеза, где все повторяется снова. На рис. 4 процесс осаждения конденсата показан стрелками, ориентированными слева направо и вниз вдоль РТ-профиля атмосферы Юпитера, тогда как отгонка испаряющихся соединений — стрелками, ориентированными во встречном направлении.

По сути, мы здесь имеем дело с гигантским гиперциклом естественного отбора химических соединений. Здесь уместно напомнить, что концепцию образования упорядоченных макромолекул из неупорядоченного вещества на основе естественного отбора выдвинул М. Эйген [17]. По его мнению, необходимо лишь найти реальный класс химических реакций, компоненты которых вели бы себя подобно дарвиновским видам, т. е. обладали бы способностью «отбираться» и соответственно эволюционировать в сторону увеличения сложности организации. Именно такими свойствами, как выяснилось, и обладают нелинейные автокаталитические цепи, собственно и названные им гиперциклами.

Однако своеобразный гиперцикл поведения углеводородных соединений в атмосфере Юпитера создает более чем прекрасные условия для естественного отбора химических соединений, нарастания их сложности и степени самоорганизации. В этих условиях наиболее вероятно развитие процессов самоорганизации в следующих направлениях: во-первых, в направлении образования углеводородных со-

единений (возможно, с участием других элементов), наиболее приспособленных к быстрому наращиванию молекулярной структуры за счет захвата низкомолекулярных углеводородных соединений из состава окружающей газовой фазы; во-вторых, в направлении развития способностей к изменению молекулярной структуры соединений, к появлению регулируемой аэродинамики этих соединений, связанной с переходом от капельной формы конденсатных образований к меняющим свою конфигурацию парящим пленочным образованиям. В отличие от Земли, где образование примитивной жизни протекало с большим выходом побочного продукта, пассивно складировавшегося в виде запасов углеводородного сырья, на Юпитере образование биоподобных сложно-молекулярных и саморегулирующихся углеводородных соединений — процесс практически безотходный. Следует учесть, что он протекает на предельно высоких скоростях в условиях повышенных температур атмосферы Юпитера. В этих условиях возможно развитие сложных трофических цепей с образованием молекулярных структур-хищников, молекулярных структур-жертв и т. д. Однако базовую основу всех этих трофических цепей должен составлять хемотрофный тип питания. Вполне логично предположить, что развитие самоорганизации этих молекулярных структур привело к появлению и закреплению механизмов передачи информации типа генетического кода, размножения наиболее устойчивых структур и всех остальных атрибутов, свойственных живым организмам. Вне всяких сомнений, эта «жизнь» будет резко контрастировать с земной аминокислотно-нуклеиновой формой жизни [5], однако не рассматривать вероятность ее возникновения всерьез было бы не вполне корректно.

В частности, большую роль в юпитерианской «жизни» может играть сера. Как показано выше, сера является обязательным продуктом реакций абиогенного углеводородного синтеза, протекающего с участием сероводорода, а в атмосфере Юпитера закономерно образует совместный конденсат с тяжелыми углеводородами. При этом следует учитывать, что низкотемпературная сера представляет собой малоактивные восьмиатомные циклические короннообразные молекулы. Однако при температуре 160–190 °С она разворачивается в открытые цепи, становясь активным полимеризатором. При еще более высоких температурах длина цепочечных молекул серы быстро сокращается, и сера в наиболее высокотемпературных условиях становится полным аналогом кислорода. В условиях жесткого естественного отбора молекулярных структур эта тройственность

свойств серы — пассивный низкотемпературный реагент, активный среднетемпературный полимеризатор и мощный высокотемпературный окислитель — может с успехом использоваться молекулярными структурами Юпитера при их адаптации в условиях жесткого естественного отбора.

Если сделанные нами логические выкладки соответствуют действительности и Юпитер в своем облачном слое концентрирует крупнейшее скопление биомассы в пределах Солнечной системы, то по отношению к этой биомассе земная биосфера находится примерно на том же уровне развития, на котором по отношению к ней находятся каменные бактерии Марса. И мы, как и эти бактерии, находимся в другом ритме времени, несопоставимо более медленном по сравнению с юпитерианскими процессами.

## Вывод

Вышесказанное позволяет утверждать, что возникновение предбиологических состояний на планетах нашей Солнечной системы (а возможно, и иных планетарных систем) является скорее правилом, чем исключением. Оно обусловлено возникновением зон абиогенного углеводородного синтеза. В свою очередь, появление этих зон в конечном счете определяется условиями развития планетарных дегазационных процессов. В то же время в ряду приведенных примеров (Земля, Марс, Юпитер) скорее исключением, чем правилом, является гелиотрофный вектор биологической эволюции, свойственный нашей планете. Кроме того, вышеприведенных примеров, на наш взгляд, вполне достаточно, чтобы показать, насколько многообразны могут быть процессы самоорганизации и саморазвития в природе даже в том случае, если рассматривать их для вполне конкретного и привычного (родного для нас) класса природных веществ — углеводородных соединений. Это обстоятельство необходимо учитывать при планировании и осуществлении поиска внеземных форм Жизни.

## Список литературы

1. Галимов Э. М. К вопросу о существовании жизни на Марсе // Астроном. вестн. 1997. Т. 31, № 3. С. 205.

2. *Бабейко А. Ю., Жарков В. Н.* Плотность и сейсмическая структура коры Марса для случая сверхнизкого температурного градиента // *Астроном. вестн.* 1998. Т. 32, № 1. С. 18.
3. *Компаниченко В. Н.* Возникновение жизни в глубинах гидротермальных систем. Хабаровск, 1996.
4. *Кононович Э. В., Мороз В. И.* Общий курс астрономии. М.: Едиториал УРСС, 2001.
5. *Ксанфомалити Л. В.* Характеристики планет, ограничивающие возможное возникновение и развитие на них жизни // *Астроном. вестн.* 1995. Т. 29, № 5. С. 399.
6. *Ксанфомалити Л. В.* Находки в SNC-метеорите ALH 84001 // Там же. 1997. Т. 31, № 3. С. 195.
7. *Мальшиев А. И.* Значение фазовых переходов «газ-жидкость» в эндогенном образовании углеводородного сырья // *Докл. АН.* 2004. Т. 399, № 3. С. 384.
8. *Мальшиев А. И.* Значение фазовых переходов «газ-жидкость» в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов // *Геохимия.* 2005. № 6. С. 673.
9. *Мальшиев А. И., Мальшиева Л. К.* Вулканизм и проблемы марсианского рельефообразования // *Вулканология и сейсмология.* 2003. № 2. С. 27.
10. *Мархинин Е. К.* Вулканы и жизнь. М.: Мысль, 1980.
11. *Мархинин Е. К.* Вулканизм и биосфера // *Вулканология и сейсмология.* 1985. № 4. С. 16.
12. *Мухин Л.М.* Планеты и жизнь. М.: Молодая гвардия, 1984.
13. *Мухин Л. М., Бондарев В. Б., Калинин В. И. и др.* Синтез органических соединений в условиях, моделирующих вулканическую деятельность // *Докл. АН СССР.* 1976. Т. 226, № 5. С. 1225.
14. *Наумов В. Б., Коваленко В. И., Дорофеева В. А.* Магматические летучие и их участие в формировании рудообразующих флюидов // *Геология рудных месторождений.* 1997. Т. 39, № 6. С. 520.
15. *Опарин А. И.* Эволюция представлений о происхождении жизни 1924–1974 гг. // *Изв. АН СССР. Сер. биол.* 1975. № 1. С. 5–10.
16. *Физические величины: Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991.*
17. *Эйген М., Шустер П.* Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. М.: Мир, 1982.

18. Фокс С. Модельные эксперименты по спонтанному формированию морфологических единиц из протеноида // Происхождение предбиологических систем. М.: Мир, 1966. С. 362.
19. Фокс С., Дозе К. Молекулярная эволюция и возникновение жизни. М.: Мир, 1975.
20. Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1976.
21. Янг Р. Морфология и химия протеноидных микросфер // Происхождение предбиологических систем. С. 351.
22. Bezard B., Drossart P., Encrenaz T., Feuchtgruber H. Benzene on the Giant Planets // *Icarus*. 2001. Vol. 154. № 2. P. 492.
23. Brock T. O. Microbial growth under extreme conditions // *Microbial growth Symposia of the Society for General Microbiology*. 1969. Vol. XXIX. / Eds. P. Meddow, S. J. Pirt. P. 15.
24. Friedson A. J. Water, ammonia, and H<sub>2</sub>S mixing ratios in Jupiter's five-micron hot spots: A dynamical model // *Icarus*. 2005. In Press.
25. Fox S. W. A theory of macromolecular and cellular origins // *Nature*. 1965. Vol. 205. P. 328.
26. Kobayashi K., Masuda H., Ushio K. et al. Formation of bioorganic compounds in simulated planetary atmospheres by high energy particles or photons // *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27. № 2. P. 207.
27. Lellouch E., Bezard B., Moses J. I. et al. The Origin of Water Vapor and Carbon Dioxide in Jupiter's Stratosphere // *Icarus*. 2002. Vol. 159. № 1. P. 112.
28. Miller S. L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions // *Science*. 1953. Vol. 117. P. 228.
29. Niemann H. B., Atreya S. K., Carignan G. R. et al. Chemical composition measurements of the atmosphere of Jupiter with the Galileo Probe Mass Spectrometer // *Adv. Space Res.* 1998. Vol. 21. № 11. P. 1455.
30. Sada P. V., Bjoraker G. L., Jennings D. E. et al. Observations of CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> in the Stratosphere of Jupiter // *Icarus*. 1998. Vol. 136. № 2. P. 192.
31. Stetter K. O. Microbial Life in Hyperthermal Environment // *ASM News*. 1995. Vol. 61. № 6. P. 285.
32. Stetter K., König H., Stackerbrandt E. *Pyrodictium* gen. nov. a new genus of submarine disc-shaped sulfur reducing archaeobacteria

- growing optimally at 105 °C // System. appl. Microbiol. 1983. 4. P. 535.
33. *Woese C. R.* The primary lines of descent and the universal ancestor / Eds. D. S. Bendal. // Evolution from molecules to men. Cambridge University Press, Cambridge, 1983. P. 209.
  34. *Woese C. R.* Microbial evolution // Microbiol. Rev. 1987. Vol. 51. P. 221–270. / *Woese C.R., Kandler O., Wheelis M.L.* Toward a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucaria // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1990. Vol. 87. P. 4576.
  35. *Young R.* Morphology and chemistry of proteinoid microspheres // The origins of prebiological systems and of their molecular matrices. Ac. Press, N.Y.-L., 1965.
  36. *Zillig W., Stetter K. O., Schafer W. et al.* Thermoproteales: a novel type of extremely thermoacidophilic archaebacteria isolated solfataras // Zbl. Bact. Hyd. I. Abl. Orig. 1981. 2c. P. 205.
  37. *Фолсом К.* Происхождение жизни. М.: Мир, 1982.

**А. В. Миронов**  
Государственный астрономический  
институт им. П. К. Штернберга

## УРОКИ КЛАССИКОВ

### Из истории развития астрофотометрии в России и СССР

В настоящей лекции обсуждаются основные вехи развития астрофотометрии в России и СССР. На примерах деятельности В. К. Цераского, В. Б. Никонова, В. Страйжиса и других показываются принципы проведения высокоточных астрономических измерений.

Звездная фотометрия в России традиционно считалась важнейшим разделом астрономических исследований. Отцом-основателем российской звездной фотометрии безусловно является В. К. Цераский. Он начал фотометрические измерения в

1875 г. Одним из наиболее значительных результатов Цераского было измерение звездной величины Солнца. В 1930-х гг. В. Б. Никонов, который впоследствии выполнил ряд важнейших работ по фундаментальной астрофотометрии, построил первый отечественный фотоэлектрический фотометр с калиевым фотоэлементом. Никонов поддержал идею о создании Вильнюсской фотометрической системы и оказал литовским астрономам моральную поддержку в этой работе. Создание Вильнюсской системы стало важным этапом мирового развития астрофотометрии. Фундаментальные идеи и методы, использованные при создании Вильнюсской системы, обеспечили основу для развития и применения новых фотометрических систем. В 1960-х гг. советские астрономы начали наблюдения с использованием способа счета фотонов. Первый советский астрофотометр со счетчиком фотонов был построен сотрудником ГАИШ В. М. Лютым. В середине 1980-х группа ученых ГАИШ разработала комплекс приборов для высокоточной фотоэлектрической фотометрии. С 1985 по 1989 г. в высокогорной обсерватории, расположенной в горах северного Тянь-Шаня, близ города Алма-Ата, были выполнены наблюдения, которые позволили создать высокоточный WBVR-каталог ярких звезд северного неба.

Достижения классиков астрофотометрии XIX—XX столетий являются фундаментом для современных программ высокоточных определений звездных величин в многоцветных фотометрических системах.

Some important milestones in the history of astrophotometry in Russia and USSR are discussed in the lecture. Principles of high-precision astronomical measurements are demonstrated with the examples of famous scientists: V. Ceraski, V. Nikonov, V. Straizys and others.

Stellar photometry was traditionally considered as an important subject of astronomical investigations in Russia. Vitold Cerasky was certain to become a "godfather" of the Russian stellar photometry. He began his photometrical works in 1875. One of the most remarkable results obtained by Cerasky was measuring the magnitude of the Sun. In the 1930s the first photoelectric photometer with a potassium photo-cell was designed by Vladimir Nikonov who executed later a set of crucial works on fundamental astrophotometry. Nikonov approved an idea to construct a Vilnius photometric system and gave moral support to Lithuanian astronomers in that work. The creation of the Vilnius system became one of the most important stages of the astrophotometry development

in the world. Most fundamental ideas and methods used while creating the Vilnius system are providing now a basis for development and application of new photometric systems. In the 1960s Soviet astronomers started the observations by photon counting method. It is Victor Lyuty, the researcher of Sternberg Institute, who built the first Soviet astrophotometer with a photon counter. In the middle of the 1980s the scientists of Sternberg Institute produced instrumentation for high-precision photoelectric photometry. From 1985 to 1989 at the High-Altitude observatory located in Northern Tien Shan mountains near the city of Alma-Ata the observations were being made which founded the basis for the WRVR-magnitude Catalogue of the brightest stars in the Northern sky.

Progress of the astrophotometry in XIX–XX centuries is a basis of modern programs for high-precision measurements of magnitudes in multicolor photometric systems.

### **В начале. В. К. Цераский**

Первые определения звездных величин небесных объектов относятся к временам Гиппарха и Птолемея, таким образом, астрофотометрия является одним из древнейших разделов астрономии. Однако с античных времен и до середины XIX в. звездная фотометрия развивалась крайне медленно. Это было связано прежде всего с тем, что единственным приемником света, приходящего от небесных светил, оставался человеческий глаз — со всеми его достоинствами и недостатками. В то время как точность измерения координат светил повышалась век от века, звездные величины определялись исключительно с помощью глазомерных оценок блеска. Точность этих оценок оставалась невысокой, что сдерживало применение долей звездной величины. Лишь в 50-х гг. XIX в. в ходе создания Bonner Durchmusterung, знаменитого Боннского обозрения неба, Фридрих Аргеландер и его сотрудники начали активно употреблять десятые (а иногда даже сотые) доли звездной величины.

Ситуация изменилась только в последней четверти XIX столетия, когда одновременно стали развиваться количественные измерения блеска звезд с помощью визуальных астрофотометров и фотографических пластинок. Это было время, когда возникали научные центры, ставшие впоследствии важнейшими центрами астрофотометрии. Была основана Потсдамская обсерватория в Германии, начина-

лись астрофотометрические работы на обсерватории Гарвардского колледжа в американском Кембридже. В это же время возникла и российская астрофотометрия.

Важную роль в развитии техники определения звездных величин сыграло создание в 1858 г. лейпцигским астрономом Целльнером визуального астрофотометра с поляризационным ослаблением света от источника сравнения. Идея фотометра Целльнера была проста. В поле зрения телескопа одновременно помещались изображение звезды и изображение маленькой диафрагмы, подсвечиваемой искусственным источником: газовой горелкой. Свет от лампы проходил через три призмы Николя и пластину из горного хрусталя. Вращением поляроидов вокруг своей оси можно было ослаблять свет лампы и добиться того, чтобы уравнилось визуальное впечатление от звезды и диафрагмы. При вращении николей свет от искусственного источника ослабляется пропорционально квадрату синуса угла между главными плоскостями поляроидов. Именно с фотометром системы Целльнера связано рождение российской астрофотометрии, которая с тех пор стала важной частью астрономических исследований в России.

Фотометр Целльнера имелся в обсерватории Московского университета, и им заинтересовался молодой сотрудник обсерватории Витольд Карлович Цераский\*. Вот что писал об этом сам Цераский.

*Я наблюдаю цельнеровским фотометром по той простой причине, что в 1875 г. в обсерватории нашелся именно этот фотометр, а не другой какой. Эта случайность оказалась, однако, счастливою...*

Но ощущение счастья пришло к Цераскому не сразу. Ему было хорошо известно, что некоторые астрономы весьма скептически относятся к измерениям с визуальными фотометрами, считая, что они по точности нисколько не превосходят простые глазомерные оценки. Только накопив достаточный опыт наблюдений с фотометром Целльнера, Цераский осознал, что точность измерений можно существенно улучшить. И он поставил перед собой цель усовершенствовать как сам фотометр, так и методику наблюдений. В своей докторской диссертации [1], защищенной в 1888 г., он пишет:

---

\* В. К. Цераский родился в 1849 г. в г. Слуцке Минской губернии. После окончания в 1871 г. Московского университета он был зачислен в штат университетской обсерватории.

*Фотометр Целльнера обыкновенной конструкции . . . представляет хорошую мысль, облеченную в неудовлетворительную форму. Недавно с разрешения Проф. Бредихина был сделан для Обсерватории новый фотометр препаратом при кафедре физики здешнего Университета г. Усагиньм, по моей модели и моим указаниям.*

В. К. Цераский, безусловно, может быть назван «отцом-основателем» российской звездной фотометрии. Цераский убрал из светового пути пластину горного хрусталя и третью призму николя и поставил второй боковой окуляр. Теперь в прямой окуляр можно было наблюдать прямой свет естественной звезды и отраженный свет искусственного источника, а в боковой окуляр — наоборот. В результате усовершенствований фотометра интервал величин звезд, которые можно измерять одновременно, был расширен почти до 5 величин. Источником света сравнения Цераский сделал керосиновую лампу. Он тщательно изучил процесс горения керосина в фитиле лампы, детально исследовал структуру пламени и пришел к выводу, что стабильность излучения лампы и, как следствие, точность измерений решающим образом зависят от качества применяемого керосина. За помощью Цераский обратился к профессору Московского университета, знаменитому химику Владимиру Васильевичу Марковникову (1837—1904). В лаборатории Марковникова для Цераского была организована дистилляция керосина.

Улучшенная версия фотометра и детально разработанная методика наблюдений позволили Цераскому достичь результатов, часть из которых не утратили своего значения даже в настоящее время. Сравнение с современными измерениями звездных величин, полученных Цераским для звезд 5—8 величины, показывают, что среднеквадратическая погрешность его измерений составляла примерно  $0^m.04$ .

Двадцатый век В. К. Цераский встретил уже как известный специалист, директор астрономической обсерватории Московского университета.

Вершиной фотометрического искусства Цераского стала работа по определению звездной величины Солнца. Наблюдения были проведены в 1903 и 1905 гг., а обработка продолжалась почти до 1911 г.

На крыше здания, находившегося в 150 м от обсерватории, было установлено специальное устройство, состоящее из бархатного черного экрана, укрепленного на месте вывернутого объектива теодолита; в центре экрана была укреплена обычная плосковыпуклая линза

с диаметром кривизны 30 мм. Очевидно, что на сферической поверхности всегда найдется точка, в которой солнечные лучи отражаются точно в направлении телескопа. Сильно расходящийся пучок ослабит солнечное излучение до такой степени, что яркость блика на стеклянной поверхности будет сравнима с блеском других ярчайших небесных светил.

Яркость солнечного блика Цераский сравнивал в дневное время с блеском Венеры. Затем, после захода Солнца, Венера сравнивалась с яркими звездами, величины которых считались известными: с  $\alpha$  Leo, Проционом, Сириусом и Полярной. Результаты, полученные Цераским [2, 3], таковы:

Звезда сравнения	Величина Солнца
$\alpha$ Leo	-26.89
$\alpha$ UMi	-26.41
$\alpha$ CMi	-26.57
$\alpha$ CMa	-26.57

Результаты сравнения Венеры с  $\alpha$  Leo Цераский сам считал ненадежными и отбросил их при окончательном усреднении. Теперь мы знаем, что Полярная — цефеида с амплитудой около  $0^m.15$ . Если мы отбросим и результаты сравнения с Полярной, то окажется, что два оставшихся результата в точности совпадают друг с другом. После редукций к нуль-пункту современной фотометрической системы  $V$  результат Цераского равен  $V_{\odot} = -26^m.72$ .

Одно из наиболее надежных современных измерений звездной величины Солнца было выполнено Л. Галлуе [4]. Он применил очень остроумный метод. Был применен телескоп системы Мерсенна\*.

Звезды сравнения наблюдались в обычном положении трубы, а Солнце — в перевернутую трубу, когда свет сначала попадает на вторичное зеркало небольшого размера. Галлуе получил  $V_{\odot} = -26^m.70$ .

В классической монографии Е. А. Макаровой, А. В. Харитонова и Т. В. Казачевской [5] «Поток солнечного излучения» в качестве среднего взвешенного из ряда уверенных современных измерений приведено значение  $V_{\odot} = -26^m.75$ .

Не правда ли, поразительно, что величина Цераского совпадает с современными данными в пределах трех процентов?!

---

\* Телескоп Мерсенна представляет собой афокальную систему из двух софокусных параболоидов.

## Прорыв. В. Б. Никонов

Вскоре после окончания Гражданской войны (1918—1921) в Петроградском университете Гавриил Адрианович Тихов (1875—1960) начал читать курс астрофотометрии. Его лекции стали основой книги «Астрофотометрия», вышедшей из печати в 1922 г. [6]. Это был первый в России учебник астрофотометрии.

В числе других студентов лекции Г. А. Тихова слушал Владимир Борисович Никонов. Он родился в том самом 1905 г., когда Цераский измерил величину Солнца, а в 1925 — окончил Ленинградский университет. В 1937 г. в сотрудничестве с Петром Григорьевичем Куликовским Никонов построил первый в СССР фотоэлектрический фотометр [7]. Светочувствительным элементом служил калиевый фотоэлемент. Наблюдения с этим фотометром производились в Грузии, в Абастуманской обсерватории, где в то время находился 13-дюймовый рефлектор Ленинградского университета. Эксперименты показали, что реальная внутренняя точность измерений весьма высока. Например, для звезд 4-й величины среднеквадратическая ошибка составляла  $0^m.003$ . К звездам 7-й величины ошибка возросла до  $0^m.015$ .

Никонов полностью осознавал, что при таких малых ошибках точность редукций к верхней границе земной атмосферы существенно зависит от особенностей метода учета атмосферной экстинкции. Пока речь шла о гораздо менее точных методах визуальной и фотографической фотометрии, эта проблема не стояла так остро. Однако ее разрешение стало необходимым при фотоэлектрических измерениях. Опыт наблюдений с очевидностью показал, что ночи, в течение которых на протяжении достаточно длительного времени (скажем, 6 часов) атмосферные условия остаются практически постоянными, исключительно редки! Если учет ослабления света в атмосфере проводится со средними коэффициентами Бугера, то внеатмосферные звездные величины и показатели цвета будут определены со значительными ошибками, различными для каждой ночи.

Во время Великой Отечественной войны В. Б. Никонов был эвакуирован из Ленинграда в Абастуманскую обсерваторию. В этот период времени ему стало ясно, *как* можно определить эти ошибки. Метод был опубликован в «Докладах АН СССР» в 1944 г. [8] и впоследствии стал известен под названием «метод Никонова». Новизна метода заключалась, во-первых, в том, что все наблюдаемые звезды, не изменяющие блеск в течение сеанса наблюдений, использовались

для определения вариаций атмосферной экстинкции в течение ночи. Никонов показал, что если имеются два наблюдения одной и той же непременной программной звезды, сделанные в такие два момента времени, когда заметно различны отношения воздушных масс программной звезды к воздушной массе экстинкционного стандарта (стандарт систематически измеряется в течение ночи и его отсчет можно проинтерполировать на любой момент ночи), то этого достаточно, чтобы вычислить поправку к коэффициенту экстинкции на моменты наблюдений программной звезды. Метод Никонова наиболее эффективен, если программа наблюдений включает наблюдения как звезд в районе зенита, так и звезд, существенно ослабленных атмосферой. Во-вторых, оригинальность метода Никонова была в том, что сначала все измерения корректировались за влияние атмосферной экстинкции с коэффициентами, полученными для типичных, средних условий. Далее из наблюдений определялись не полные значения коэффициентов экстинкции, а малые поправки к ним. Это обеспечивало устойчивость метода.

Другим достижением В. Б. Никонова было открытие метода учета межзвездной экстинкции. В 1954 г. он опубликовал статью, в которой впервые было показано, что многоцветная фотометрия открывает широкие возможности для точного определения истинных показателей цвета звезд, а следовательно, и для исследования селективного поглощения света межзвездным веществом [9].

## Вторая половина XX в.

В начале 1960-х гг. идеи Никонова были подхвачены командой молодых астрономов из Вильнюсской обсерватории. Возглавлял этот коллектив Витаутас Страйжис. Глубоко понимая проблему классификации звезд по спектральным типам фотометрическими способами, при горячей поддержке В. Б. Никонова и московских астрономов (прежде всего профессора Бориса Васильевича Кукаркина) Страйжис и его сотрудники разработали семицветную Вильнюсскую фотометрическую систему [10]. Для определения ширин и положений светофильтров на шкале длин волн сначала был создан первый достаточно точный и полный атлас распределения энергии в спектрах звезд различных спектральных типов. Затем, используя методы синтетической фотометрии (т. е. вычисляя свертки функций распределения энергии с кривыми пропускания светофильтров), были найдены оптимальные характеристики всех фотометрических полос.

Вильнюсская система в течение долгого времени была единственной фотометрической системой, позволяющей проводить двумерную (по температуре и светимости), а иногда и трехмерную (еще и по содержанию тяжелых элементов) классификацию звезд в широком диапазоне температур и *при наличии межзвездного поглощения*.

В 1960-х гг. советские астрономы начали проводить фотометрические измерения с помощью метода счета фотонов. Первый такой фотометр был построен сотрудником ГАИШ Виктором Михайловичем Лютым. Фотометр начал действовать в Крымской лаборатории ГАИШ в 1966 г. [11]. В то время советская промышленность еще не выпускала фотоумножителей, пригодных для этой цели. Первый советский астрофотометр со счетчиком фотонов стал эффективно работать после того, как директор ГАИШ Дмитрий Яковлевич Мартынов привез из своей поездки в Австралию пять ФЭУ производства английской фирмы EMI. В условиях холодной войны зарубежные фотоумножители не могли быть приобретены Советским Союзом официальным путем. Мартынов привез пять приборов буквально в своем кармане\*.

Фотометр Лютого с фотоумножителем EMI эффективно использовался много лет. Сочетание его с 60-сантиметровым телескопом обеспечивало измерение звездных величин со среднеквадратичной погрешностью около  $0^m.01$  для звезд 14-й величины при времени накопления порядка 2 мин. Большое количество фотометрических наблюдений тесных двойных звезд, двойных систем с релятивистским компонентом, ядер Сейфертовских галактик и других переменных объектов было выполнено с использованием фотоумножителей, привезенных Д. Я. Мартыновым. Систематически участвовал в этих работах нынешний директор ГАИШ Анатолий Михайлович Черепашук.

Работы В. Б. Никонова, вильнюсских и крымских фотометристов стимулировали дальнейшее развитие звездной фотометрии в Москве.

В середине 1970-х гг. группа наблюдателей ГАИШ МГУ, возглавляемая Хабибрахманом Халиуллиным, начала фотометрические наблюдения звезд в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории, расположенной в Казахстане, неподалеку от города Алма-Ата в горах Заилийского Ала-Тау на высоте около 3000 м над уровнем моря. На-

---

\* Впоследствии советский фотоумножитель ФЭУ-79, выпускавшийся Московским электроламповым заводом, был модернизирован и стал во всех отношениях первоклассным прибором, вполне пригодным для счета фотонов.

блюдения производились в новой фотометрической системе *WBVR* [12]. Эти усилия привели в итоге к созданию высокоточного фотометрического каталога ярких звезд северного неба. Ученые ГАИШ создали специальный автоматизированный измерительный комплекс для высокоточной фотоэлектрической фотометрии, в котором советские малые вычислительные машины «Электроника-60» использовались для хранения исходной информации, для управления процессом наблюдений и для записи полученных данных. Наблюдения звезд, вошедших в каталог, были выполнены в 1985—1989 гг. На различных стадиях проекта руководство осуществляли Хабибрахман Халиуллин и Виктор Геральдович Корнилов. Каталог содержит данные для 13 600 звезд северного неба, более ярких, чем  $V = 7^m.2$ , на большом участке небесной сферы от северного полюса до склонения  $\delta = -15^\circ$  [13, 14]. Программа для наблюдений на каждую ночь и порядок дальнейшей обработки данных основывались на модифицированном методе Никонова, обобщенном для случая многоцветной гетерохромной фотометрии. В результате атмосферная экстинкция определялась с высокой точностью, а величину случайной ошибки одного измерения удалось резко снизить и довести до значения  $0^m.006$ . В настоящее время этот каталог *WBVR*-величин часто называют Тянь-Шаньским фотометрическим каталогом.

Следует отметить, что практически такой же по величине ошибки характеризуются индивидуальные фотометрические измерения, произведенные по программе *Hipparcos* в полосе *H $\alpha$* .

## Уроки классиков

Как видно, вся история развития астрофотометрии является историей борьбы за повышение точности измерений звездных величин. От среднеквадратической ошибки глазомерных оценок, равной нескольким десяткам звездной величины, точность современных измерений доведена до нескольких тысячных долей величины.

Деятельность В. К. Цераского учит нас быть предельно аккуратными при проведении и обработке астрофотометрических измерений. Ведь относительно несложные изменения конструкции фотометра Целльнера в совокупности с совершенной методикой проведения и редукций наблюдений позволили улучшить точность итоговых звездных величин в несколько раз.

В методе Никонова содержится мощная идея обработки наблюдений. Говоря современными терминами, любая обработка наблюдений

является обратной, некорректно поставленной задачей. Поэтому мы можем рассчитывать на достоверный результат только тогда, когда уже знаем достаточно много об искомом решении. Никонов применял начальное приближение в виде средних бугеровских коэффициентов прозрачности. Нахождение из измерений только малых поправок обеспечивало ему устойчивость решения.

Метод Никонова разрабатывался для квазимонохроматического света. Современные методы учитывают гетерохромный состав излучения звезд. Последователи Никонова — создатели Тянь-Шаньского фотометрического каталога, в качестве начального приближения применяли специально рассчитанную модель ослабления света звезд в атмосфере. Эта модель учитывала спектральный состав излучения звезды, спектральную чувствительность применяемого приемника излучения и спектральное пропускание атмосферы с учетом высоты над уровнем моря, температуры, содержания оптически активных газов (озона, водяного пара и т. д.), содержания аэрозолей и пр. После предварительного учета экстинкции с помощью начального приближения из наблюдений определялась поправочная функция в виде несложного полинома от длины волны.

Вильнюсские фотометристы довели до совершенства методы синтетической фотометрии. В их работах убедительно показывается, что процесс измерений можно и нужно предварительно моделировать математическими способами. Это позволяет заранее оценить пределы возможных погрешностей, правильно подобрать необходимые светофильтры и стандарты и спланировать порядок измерений.

Опыт московской группы, создавшей Тянь-Шаньский каталог, показывает, что при добросовестном учете необходимых факторов точность наземной фотометрии не уступает точности, получаемой при внеатмосферных измерениях.

Успехи астрофотометрии, достигнутые в XIX—XX столетиях, являются фундаментом для современных программ высокоточных определений звездных величин в многоцветных фотометрических системах.

Закончить эту лекцию я хочу строками из докторской диссертации В. К. Цераского, написанными 130 лет назад:

*В заключение да позволено будет нам выразить горячее желание, чтобы это рассуждение попало в руки и принесло пользу занимающимся астрофотометрией. Вся работа представляет механизм несложный, но наблюдения требуют значительной осторожности и принятия во внимание многих мелочей.*

*Хорошее наблюдение есть фундамент наших знаний о природе и всегда будет иметь значение.*

### Список литературы

1. *Цераский В. К.* Астрономический фотометр и его приложения (докторская диссертация) // Математический сборник 1887. Т. XIII.
2. *Цераский В. К.* Фотометрическое определение звездной величины Солнца // *Astronomische Nachrichten*. 1905. Т. 170, № 4065. (На фр. яз.)
3. *Цераский В. К.* Фотометрическое определение звездной величины Солнца. Ч. 1, 2. // Тр. Москов. обсерватории. II сер. 1911. Т. 5. (На фр. яз.)
4. *Gallouette L.* Magnitude stellaire du soleil. // *Annales d'Astrophys*. 1964. Vol. 27. P. 423.
5. *Макарова Е. А., Харитонов А. В., Казачевская Т. В.* Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991.
6. *Тихов Г. А.* Курс астрофизики. Т. 1. Астрофотометрия. Пг.: Науч. книгоиздательство, 1922.
7. *Никонов В. Б., Куликовский П. Г.* Первый советский электрофотометр // *Астроном. журн.* Т. 16. № 4. С.54.
8. *Никонов В. Б.* Об учете атмосферной экстинкции при электроколориметрических наблюдениях звезд // *Докл. Академии наук СССР*. 1944. Т. 45. С. 151.
9. *Никонов В. Б.* О применении многоцветной электроколориметрии к изучению избирательного поглощения в межзвездной среде // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории*. 1954. Т. 12. С. 134.
10. *Страйжис В. Л.* Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас, 1977.

11. *Лютый В. М.* Автоматический электрофотометр со счетом фотонов // *Астроном. цирк.* 1967. № 446. С. 6.
12. *Khaliullin Kh., Mironov A. V., Moshkalyov V. G.* The New Photometric System *WBVR* // *Astrophys. Sp. Sci.* 1985. Vol. 111. P. 291.
13. *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. и др.* Каталог *WBVR*-величин ярких звезд северного неба // *Тр. Государств. астроном. ин-та им. П. К. Штернберга.* М.: Изд-во МГУ, 1991. Т. 63.
14. *Kornilov V. G., Mironov A. V., Zakharov A. I.* The *WBVR* Photometry of Bright Northern Stars // *Baltic Astronomy.* 1996. Vol. 5. P. 379.

**В. В. Орлов, А. В. Рубинов**  
Санкт-Петербургский государственный университет

**МОДЕЛИ ГАЛАКТИКИ:  
АБСТРАКЦИЯ И РЕАЛЬНОСТЬ**

**Введение**

С древних времен люди наблюдали на небе Млечный Путь. Долгое время оставалась неясной природа этой глобальной структуры. Полная драматизма история выяснения истинной сущности Млечного Пути описана в книге Ю. Н. Ефремова [1].

Еще сэр Вильям Гершель в конце XVIII в. пытался исследовать структуру Млечного Пути методом «звездных черпков», т. е. подсчетов звезд в разных направлениях и определения на основе этих подсчетов пространственной плотности звезд на разных расстояниях от Солнца. Гершель оценил видимое сжатие этой звездной системы, составляющей основу «Вселенной Гершеля».

Еще одна схема строения Млечного Пути была предложена в начале XX в. голландским астрономом Якобом Каптейном. Вселенная Каптейна представляла собой двояковыпуклую линзу диаметром около 20 кпк, причем Солнце находилось на расстоянии 650 пк от центра этой линзы.

С Каптейном полемизировал американский астроном Харлоу Шепли, который пытался воссоздать пространственную структуру Млечного Пути по распределению шаровых скоплений. Он обнаружил концентрацию шаровых скоплений в направлении созвездия Стрельца. В том же направлении концентрируются наиболее яркие облака Млечного Пути. Шепли отождествил центр нашей «островной вселенной» с центром подсистемы шаровых скоплений и оценил расстояние от Солнца до центра системы Млечного Пути в 15 кпк, а размер системы примерно в 90 кпк. В результате Солнце «уехало» на значительное расстояние от центра «Вселенной».

Таким образом, в начале 20-х гг. прошлого века сложились две существенно различные модели нашей звездной системы: Вселенные Каптейна и Шепли. Эти две системы столкнулись в «великом споре» между двумя американскими астрономами Харлоу Шепли и Гебером Кертисом, состоявшемся 26 апреля 1920 г. в Американской Национальной Академии наук в Вашингтоне. Обе стороны остались при своем мнении, а истина, как часто бывает, находилась посередине. Измеренные Шепли расстояния оказались завышены примерно в 2—3 раза. С другой стороны, Кертис считал ярчайшие красные звезды шаровых скоплений карликами главной последовательности, в то время как в действительности они оказались гигантами.

Кстати, во второй части «великого спора» Шепли высказывался против существования других «островных вселенных» — галактик. В этой части дискуссии прав оказался Кертис, который правильно объяснил отсутствие спиральных туманностей вблизи плоскости Млечного Пути экранировкой их слоем поглощающей материи, концентрирующейся к экваториальной плоскости нашей Галактики. Интересно отметить, что сам термин «галактики» был введен в астрономический обиход благодаря Харлоу Шепли.

Дальнейшие исследования структуры и кинематики нашей Галактики связаны с именами шведского астронома Бертина Линдблада и голландского астронома Яана Оорта. Они обнаружили быстрое вращение диска Галактики и более медленное вращение сферической подсистемы, в которую входят и шаровые скопления.

Открытие внешних дисковых галактик, обладающих спиральной структурой, свидетельствовало в пользу того, что и наша Галактика может обладать спиральным узором. Первые указания на наличие спиральных ветвей в Галактике даны в краткой заметке Моргана и др. [2]. Эти авторы обнаружили признаки спиральных ветвей в

распределении близких областей ионизованного водорода. В работе де Вокулера [3] было впервые указано на возможность наличия бара в центральной части Галактики.

## Постановка задачи

При построении реалистичной модели нашей Галактики встает задача восстановления глобального распределения гравитирующей материи по данным о распределении тех или иных объектов в Галактике и ее ближайших окрестностях. При решении этой задачи мы можем исходить из двух различных посылок:

- исходное распределение — распределение плотности вещества, а закон потенциала получается как решение уравнения Пуассона;
- исходное распределение — распределение гравитационного потенциала, а распределение плотности получается с помощью дифференцирования потенциала по координатам из того же уравнения Пуассона.

Оба этих способа имеют определенные достоинства и недостатки. В первом случае мы используем наблюдательные данные непосредственно, например результаты звездных подсчетов с учетом поглощения света в диске Галактики. Однако при получении закона потенциала мы можем столкнуться с существенными техническими трудностями при решении уравнения Пуассона. Во втором случае нам приходится априорно предполагать определенное аналитическое выражение для потенциала Галактики, а затем тем или иным способом «подгонять» совокупность свободных параметров к имеющимся в нашем распоряжении наблюдательным данным. Здесь наша задача — угадать аналитическое выражение, которое наилучшим образом аппроксимирует совокупность наблюдательных данных. Таким образом, оба подхода к построению реалистичных моделей Галактики не лишены элементов творчества и вдохновения.

Прежде чем перейти к изложению конкретных моделей, рассмотрим кратко те наблюдательные данные, которые мы можем использовать при построении модели Галактики.

В первую очередь это различные популяции звезд и звездных скоплений:

- близкие звезды, для которых имеются наиболее точные пространственные координаты и скорости благодаря космическому проекту HIPPARCOS, высокоточным определениям лучевых скоростей с приборами типа CORAVEL и комбинации наземных наблюдений с данными HIPPARCOS (каталог Tycho-2);
- яркие звезды, наблюдающиеся на значительных расстояниях от Солнца (цефеиды, переменные RR Lyr, красные гиганты и сверхгиганты, звезды горизонтальной ветви);
- рассеянные скопления диска Галактики;
- шаровые скопления сферической составляющей и балджа Галактики.

Во-вторых, это составляющие газовой подсистемы Галактики:

- области ионизованного водорода H II;
- поле скоростей и пространственное распределение нейтрального водорода H I, основанное на радионаблюдениях на длине волны  $\lambda = 21$  см;
- молекулярные облака;
- планетарные туманности.

В последнее время для построения галактических моделей используются также данные о гравитационном микролинзировании.

В качестве исходной информации используются кривые вращения для различных объектов в Галактике, пространственные распределения тех или иных объектов, распределения остаточных скоростей. При этом выделяется несколько основных подсистем: тонкий и толстый диски, гало, балдж, центральный бар, спиральные ветви. Рассматриваются как модели отдельных подсистем, так и комбинированные модели, включающие сразу несколько подсистем. Обзор последних достижений в построении моделей распределений массы и светимости различных подсистем Галактики дан Герхардом [4].

Определенные ограничения на галактические модели можно получить из локальных структурных и кинематических параметров Галактики. Один из важнейших таких параметров — расстояние  $R_0$  от Солнца до центра Галактики. Критический обзор оценок  $R_0$  дан Никифоровым [5]. В этой работе выведено «наилучшее» значение  $R_0 = 7.9 \pm 0.2$  кпк.

Два других параметра, характеризующих вращение Галактики в окрестности Солнца, — постоянные Оорта  $A$  и  $B$ . Эти постоянные

связаны с круговой скоростью  $v_c$  и ее производной  $dv_c/dR$  по радиусу в окрестности Солнца. В частности,  $A - B = v_c/R_0$  и  $A + B = -dv_c/dR(R_0)$ . В литературе имеется множество оценок  $A$  и  $B$ . Их значения зависят от выборки звезд, по которым определяются постоянные Оорта. Так, например, Оллинг и Денен [6] находят значимые изменения постоянных Оорта с цветом звезд. Они рассматривают в качестве наиболее подходящих объектов для определения «истинных» значений постоянных Оорта красные гиганты, поскольку это достаточно старая популяция для достижения равновесия в поле Галактики. Кроме того, она содержит достаточно далекие объекты, чтобы избежать эффекта возможных локальных аномалий типа звездных потоков. Эти авторы получают оценки  $A \approx 16$ ,  $B \approx -17$ ,  $A - B \approx 33$  км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup> с погрешностью около 2 км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup>. Также Оллинг и Денен находят значимый радиальный дрейф популяции красных гигантов  $C \approx -10$  км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup> примерно с такой же ошибкой 2 км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup>. Кстати, равенство  $A = -B$  в пределах ошибок свидетельствует о том, что кривая вращения в окрестности Солнца приблизительно плоская.

Разность  $A - B$  можно оценить независимо из измерений собственного движения компактного радиоисточника  $Sgr A^*$ , обычно отождествляемого с центром Галактики. Так, например, Фамай и Дежонг [7], по данным Бакера [8], получают оценку  $A - B = 30.1 \pm 0.8$  км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup>, что в пределах  $2\sigma$  согласуется с оценкой Оллинга и Денена [6]. Оценка [7] получена в предположении, что радиоисточник  $Sgr A^*$  неподвижен относительно центра Галактики. В действительности этот компактный массивный ( $\approx 3 \cdot 10^6 M_\odot$ ) объект может дрейфовать в окрестности динамического центра Галактики за счет взаимодействия с окружающими объектами (например, звездными скоплениями или газовыми облаками).

Еще один важный параметр, использующийся при построении галактических моделей, — плотность массы  $\rho_0$  в окрестности Солнца. Одну из первых оценок величины  $\rho_0 = 0.092 M_\odot/\text{пк}^3$  из уравнения Пуассона для почти круговых орбит получил Оорт в 1932 г. [9]. В своей работе Оорт отмечает, что близкая оценка  $\rho_0 = 0.099 M_\odot/\text{пк}^3$  была найдена Каптейном [10] в той самой работе, где он предложил свою модель Галактики. Интересно, что обе эти оценки прекрасно согласуются с современной оценкой  $\rho_0 = 0.102 \pm 0.010 M_\odot/\text{пк}^3$ , найденной в работе Холмберга и Флинна [11] по результатам наблюдений на спутнике HIPPARCOS.

## Модели

Модели Галактики можно подразделить на осесимметричные и неосесимметричные. В первом случае потенциал (и плотность) зависит только от цилиндрических координат  $(R, z)$ , причем он является четной функцией от  $z$ .

Рассмотрим в качестве примера модель Флинна и др. [12]. Эта модель обладает ротационной симметрией. Она состоит из трех основных компонент:

1. центральная сферически симметричная составляющая с потенциалом

$$\Phi_C(R, z) = -\frac{GM_{C_1}}{(R^2 + z^2 + r_{C_1}^2)^{1/2}} - \frac{GM_{C_2}}{(R^2 + z^2 + r_{C_2}^2)^{1/2}} ;$$

2. диск — суперпозиция трех моделей Миямото—Нагаи [13] с потенциалом

$$\Phi_D(R, z) = -\sum_{n=1}^3 \frac{GM_{D_n}}{\{R^2 + [a_n + (z^2 + b^2)^{1/2}]^2\}^{1/2}} ;$$

3. сферическое гало с потенциалом

$$\Phi_H(R, z) = \frac{1}{2} V_H^2 \ln(R^2 + z^2 + r_0^2) .$$

Общий потенциал Галактики

$$\Phi(R, z) = \Phi_C + \Phi_D + \Phi_H$$

зависит от 13 параметров

$$\{r_0, V_H, r_{C_1}, M_{C_1}, r_{C_2}, M_{C_2}, b, a_1, M_{D_1}, a_2, M_{D_2}, a_3, M_{D_3}\}.$$

Флинн и др. [12] подбирают значения этих параметров так, чтобы согласовать кривую вращения, а также глобальные и локальные характеристики диска — радиальный масштаб, поверхностную плотность в окрестности Солнца, приблизительно экспоненциальный профиль проективной плотности. Интересно отметить, что один из дисков Миямото—Нагаи имеет отрицательную плотность, однако

полная плотность модели положительна во всех точках. Неотрицательность полной плотности — еще один из тестов моделей Галактики на физичность.

Оценка параметров модели — довольно сложная задача математической статистики. При ее решении используются различные подходы: от простой подгонки до сложных алгоритмов нелинейного программирования. Часто детали процедуры определения параметров остаются за кадром — авторы приводят только значения параметров и, как правило, ничего не говорят о погрешностях найденных параметров. В этом плане позитивно выделяется работа Кутузова и Осипкова [14], в которой авторы находят интервальные оценки параметров.

Недавно появились новые дополнительные тесты различных моделей Галактики (см. статью Гончарова и Орлова [15]). С этой целью можно использовать хронологический анализ некоторых глобальных повторяющихся событий в истории Земли, например, массовых вымираний организмов, выпадений крупных космических тел на поверхность Земли, всплесков частоты геомагнитных инверсий, вариаций изотопных отношений некоторых химических элементов (например, стронция). Эти явления часто согласованы друг с другом и могут иметь общую причину галактической природы. Например, причина может быть связана с пересечениями Солнечной системой плоскости Галактики. В окрестности экваториальной галактической плоскости повышается вероятность сближения Солнечной системы с гигантскими молекулярными облаками. Такие сближения могут вызвать «кометные ливни» из внешней части облака Оорта, что приводит к увеличению частоты выпадения крупных небесных тел на поверхность Земли.

В работе Гончарова и Орлова [15] обнаружен шаг повторяемости для событий массовых вымираний, равный  $(183 \pm 3) \cdot 10^6$  лет. Этот шаг согласуется с аномалистическим периодом (интервалом времени между прохождением Солнца через апоцентр своей галактической орбиты) в модели Аллен и Мартоса [16]. Таким образом, эта модель имеет некоторое преимущество перед другими моделями, для которых такой четкой повторяемости не обнаружено.

Интересная цикличность массовых вымираний морских организмов была обнаружена недавно в работе Роде и Муллера [17]. Эти авторы с помощью Фурье-анализа нашли статистически значимую цикличность с периодом  $(62 \pm 3) \cdot 10^6$  лет. Интересно заметить, что эта величина примерно втрое меньше выявленного шага повторяе-

мости в работе [15]. Авторы [17] рассматривают несколько возможных причин выявленной ими цикличности, в том числе прохождения Солнечной системы через молекулярные облака, спиральные ветви или сквозь плоскость Галактики.

Еще один класс объектов, который можно в принципе использовать для тестирования моделей гравитационного поля Галактики, — двойные пульсары. Наблюдаемые изменения орбитальных периодов этих объектов вызваны несколькими факторами, в том числе и различиями внешних гравитационных полей в месте расположения пульсара в Галактике и в месте расположения Солнца. Измерив относительное изменение орбитального периода  $\dot{P}/P$  пульсара и учтя другие дополнительные эффекты (гравитационное излучение, собственное движение пульсара относительно Солнца и др.), мы найдем остаточное изменение, связанное с галактическим полем. Сравнив этот остаток с прогнозом по той или иной галактической модели, мы получим дополнительный критерий качества рассматриваемой модели. Однако следует заметить, что для надежного тестирования моделей Галактики требуется значительное число двойных пульсаров в различных местах Галактики с надежно определенными величинами  $\dot{P}/P$  и другими характеристиками (расстояниями, собственными движениями, массами и пр.). Пока таких объектов известно всего несколько, причем в основном в близкой окрестности Солнца.

Построенные модели Галактики представляют интерес для решения различных проблем галактической астрономии. Одна из таких проблем — изучение орбит звезд, звездных скоплений и других объектов в галактическом поле. Классификация орбит звезд ближайшей окрестности Солнца радиусом 25 пк в модели Галактики Кутузова и Осипкова [14] была проведена в работе Мюллери и др. [18]. Подавляющее большинство орбит оказались ящикообразными в меридиональной (сопутствующей) плоскости, движущейся вместе со звездой в Галактике, проходящей через центр Галактики и ортогональной к экваториальной плоскости Галактики. Эти звезды представляют население диска. Также было найдено несколько трубкообразных и бананообразных орбит. Эти орбиты обычно наблюдаются у звезд населения гало и толстого диска.

Следует отметить, что имеющиеся модели гравитационного поля Галактики стационарны, т. е. их потенциалы и силы не зависят явно от времени. Возникает вопрос об их равновесности и устойчивости.

Обычно авторы не исследуют этот вопрос, поскольку здесь требуется не только знание потенциала, но и знание фазовой плотности, что является гораздо более сложной задачей.

В последнее время появляются работы по моделированию химико-динамической эволюции Галактики (см., например, [19], [20]). В процессе эволюции выделяются различные подсистемы Галактики — гало, балдж с баром и диск. Структура, кинематика и химический состав этих подсистем согласуются с данными наблюдений.

## Выводы

Таким образом, к настоящему времени в литературе имеется целый ряд моделей нашей Галактики. Они представляют собой набор аналитических выражений для потенциала, силы, плотности и других характеристик как функций от координат. Эти выражения зависят от ряда параметров. Значения параметров авторы оценивают по данным наблюдений. Любая такая модель представляет собой некоторый абстрактный объект, аппроксимирующий регулярное гравитационное поле реальной системы — нашей Галактики.

В связи с этим имеется несколько проблем, которые до сих пор не нашли исчерпывающего решения.

1. Каким образом подобрать аналитическое выражение для потенциала, наилучшим образом представляющее реальную Галактику?
2. Каким образом найти набор параметров, соответствующих наилучшему представлению гравитационного поля Галактики в рамках выбранного нами выражения для потенциала?
3. Каким образом мы можем протестировать ту или иную модель Галактики?

Эти вопросы ждут своего решения.

Авторы благодарят Фонд поддержки Ведущих научных школ (грант 1078. 2003. 02) и Российский фонд фундаментальных исследований (код проекта 04-02-17447) за финансовую поддержку.

## Список литературы

1. *Ефремов Ю. Н.* Звездные острова. Фрязино: Век2, 2005.

2. *Morgan W. W., Sharpless S., Osterbrock D.* Some features of galactic structure in the neighborhood of the Sun // *Astron. J.* 1952. Vol. 57. P. 3.
3. *Vaucouleurs G. de* Interpretation of velocity distribution of the inner regions of the Galaxy // In «The Galaxy and the Magellanic Clouds». Proc. IAU Symp. 20. 1964. P. 195.
4. *Gerhard O.* Mass distribution in our Galaxy // *Space Sci. Rev.* 2002. Vol. 100. P. 129.
5. *Никифоров И. И.* Проблема определения расстояния до центра Галактики ( $R_0$ ). // *Вестн. РФФИ.* 2006. (В печати).
6. *Olling R. P., Dehnen W.* The Oort Constants Measured from Proper Motions // *Ap. J.* 2003. Vol. 599. P. 275.
7. *Famaey B., Dejonghe H.* Three-component Stäckel potentials satisfiung recent estimates of Milky Way parameters // *MNRAS.* 2003. Vol. 340. P. 752.
8. *Backer D. C.* Diameter and proper motion of *Sgr A\** // In «Unsolved problems of the Milky Way». Proc. IAU Symp. 169. 1996. P. 193.
9. *Oort J. H.* The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems // *Bull. Astron. Inst. Netherland.* 1932. Vol. 6. P. 249.
10. *Kapteyn J. C.* First attempt at a theory of the arrangement and motion of the siderial system // *Ap. J.* 1922. Vol. 55. P. 302.
11. *Holmberg J., Flynn C.* The local density of matter mapped by *Hipparcos* // *MNRAS.* 2000. Vol. 313. P. 209.
12. *Flynn C., Sommer-Larsen J., Christensen P. R.* Kinematics of the outer stellar halo // *Ibid.* 1996. Vol. 281. P. 1027.
13. *Miyamoto M., Nagai R.* Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies // *Publ. Astron. Soc. Jap.* 1975. Vol. 27. P. 533.
14. *Кутузов С. А., Осипков Л. П.* Двухкомпонентная модель гравитационного поля Галактики // *Астроном. Журн.* 1989. Т. 66. С. 965.
15. *Гончаров Г. Н., Орлов В. В.* Глобальные повторяющиеся события в истории Земли и движение Солнца в Галактике // Там же. 2003. Т. 80. С. 24.

16. *Allen C., Martos M. A.* A simple, realistic model of the galactic mass distribution for orbit computations // *Revista Mex. Astron. Astrofis.* 1987. Vol. 14. P. 226.
17. *Rohde R. A., Muller R. A.* Cycles in fossil diversity // *Nature.* 2005. Vol. 434. P. 208.
18. *Mülläri A. A., Mülläri T. B., Orlov V. V. et al.* Catalogue of orbits of nearby stars: preliminary results // *Astron. Astroph. Trans.* 1998. Vol. 15. P. 19.
19. *Nakasato N.* Initial model catalogue for Galaxy evolution // *Publ. Astron. Soc. Austral.* 2004. Vol. 21. P. 171.
20. *Samland M.* A model for the formation of the Milky Way // *Ibid.* 2004. Vol. 21. P. 175.

**Н. Ф. Санько<sup>1</sup>, Б. М. Шустов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное космическое агентство России

<sup>2</sup>Институт астрономии РАН

## **РОССИЙСКАЯ ПРОГРАММА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В конце 2005 г. Правительство Российской Федерации утвердило Федеральную космическую программу России. В лекции описывается содержание этого важнейшего для развития космической науки в России документа.

At the end of 2005 the Government of the Russian Federation has approved the Federal Space Program of Russia. The lecture deals with this document that is vitally important for the development of fundamental space research in Russia.

Все окружающие нас достижения цивилизации обязаны своим существованием проводившимся ранее фундаментальным научным исследованиям. Например, двигатели внутреннего сгорания не могли бы существовать без сделанных когда-то открытий в таких научных

---

© Н. Ф. Санько, Б. М. Шустов, 2006

направлениях, как термодинамика, молекулярная физика, электродинамика, магнетизм, органическая химия и т. д. Некоторые из результатов фундаментальных исследований внесли и вносят настолько решающий вклад в технический прогресс, что это определяет облик человеческой цивилизации. Фундаментальные науки, изучающие Вселенную, занимают достойное место среди этих принципиально важных направлений. Достаточно напомнить, что гелий был открыт на Солнце и только потом найден на Земле, или что для ядерной физики некоторые объекты во Вселенной являются естественной лабораторией, где сама Природа ставит эксперименты, которые невозможны в земных лабораториях. Еще в 1920 г., задолго до создания ядерной физики, на термоядерную реакцию превращения водорода в гелий было указано Артуром Эддингтоном как на источник энергии излучения звезд. Изучение многих явлений в горячей плазме принципиально важно для решения величайшей энергетической проблемы Человечества — управляемого термоядерного синтеза. Это очень сложные и дорогостоящие даже по масштабам всего человечества эксперименты. Но такие исследования можно проводить с гораздо меньшими затратами в природном «реакторе» — плазме, заполняющей околоземное космическое пространство. Кроме того, фундаментальные космические исследования оказывают мощное прямое воздействие (с которым может сравниться разве что оборонная индустрия) на развитие технологий. Это происходит из-за постоянных требований экспериментаторов к повышению чувствительности, разрешающей способности и улучшению других параметров научных приборов. И конечно, фундаментальные космические исследования дали мощный толчок развитию наших представлений об устройстве Вселенной.

По мнению многих выдающихся ученых современности, на рубеже XX и XXI вв. мы стали свидетелями «революции» в астрономии, которая имеет не менее важное значение, чем ставшая основополагающей для многих отраслей науки, а значит и современных технологий, «революция» в физике, которая произошла в начале XX в. Огромную роль в этом играют и уже сыграли космические средства, обеспечивающие научные исследования многих объектов Вселенной. Они позволяют проводить астрофизические исследования далеких объектов с помощью телескопов, вынесенных за пределы земной атмосферы, затрудняющей или исключаящей возможность многих видов наблюдений с поверхности Земли. Космические аппараты способны донести научную аппаратуру до многих объектов Солнечной

системы с тем, чтобы мы могли изучать их дистанционно, но находясь в непосредственной близости от них или производить непосредственные — контактные исследования (*in situ*). В условиях длительного воздействия космических факторов: вакуума, невесомости (точнее микрогравитации и микроускорений) и т. д. на борту космического аппарата — ученые могут проводить такие биологические и технологические эксперименты, которые абсолютно невозможны на Земле.

Россия как наследница великой космической державы — Советского Союза — естественно стремилась и стремится сохранить этот престижный статус. Однако в 90-е гг. прошлого века и в самом начале нынешнего ситуация в сфере космической деятельности России и особенно в фундаментальных космических исследованиях оставалась весьма удручающей (см., например, публикацию Б. М. Шустова в трудах данной школы за 2003 г.). Финансирование было настолько недостаточным и нестабильным, что о выполнении планов развития проектов можно было только мечтать. В последние годы ситуация заметно меняется к лучшему. При этом руководство страны, как нам представляется, осознает тот факт, что великой космической державой может считаться только такая страна, которая проводит весомую программу научных исследований в космосе. Итогом проводимой в последнее время политики стало появление важного государственного документа, основного в планировании космической деятельности — Федеральной космической программы России на период 2006—2015 гг. (ФКП).

В ФКП фундаментальным исследованиям уделено важное место — запланировано выполнение более двух десятков проектов научного назначения. Среди них есть полномасштабные космические проекты, в рамках которых должны быть созданы специализированные космические аппараты, снабженные целевыми комплексами научной аппаратуры. Кроме того, будет практиковаться дополнительная установка комплексов научной аппаратуры на отечественные космические аппараты, предназначенные для решения народнохозяйственных задач, а также установка отечественной научной аппаратуры на зарубежные космические аппараты научного назначения.

Особенностью реализации научных космических проектов будет максимальное использование так называемых унифицированных космических платформ — основных составляющих космических аппаратов, на которые возлагается функция обеспечения необходимых

условий работы полезной нагрузки — целевой аппаратуры: для научных исследований, дистанционного зондирования Земли, обеспечения радиосвязи и т. п.

Модульная технология создания космической платформы позволяет с небольшими затратами и в короткие сроки адаптировать возможности платформы к применению в составе космических аппаратов разного типа с разной целевой аппаратурой. Например, в рамках проекта «Фобос—Грунт» Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина разрабатывает космическую платформу, пригодную для целого ряда будущих проектов научного назначения.

В рамках ФКП в разделе «Космические средства для фундаментальных космических исследований» и разделе «Космические средства технологического назначения» предусмотрено, что они и далее будут проводиться по следующим основным направлениям:

- внеатмосферная астрофизика;
- планетология;
- исследование планет и малых тел Солнечной системы;
- изучение Солнца, космической плазмы и солнечно-земных связей;
- исследования в областях космической биологии, физиологии и материаловедения.

Кратко опишем включенные в программу проекты.

### **Внеатмосферная астрофизика — получение научных данных о происхождении и эволюции Вселенной**

Современные астрофизические космические исследования позволяют получить уникальные данные об объектах и процессах, протекающих во Вселенной, которые не могут быть изучены в земных лабораториях. Это, в свою очередь, предоставляет возможность осуществить глубокий прорыв в исследовании фундаментальных свойств материи и получить новую информацию в области ядерной и квантовой физики, теории относительности, проблем пространства — времени и т. п. В ФКП для решения задач этого научного направления предусмотрено выполнение следующих полномасштабных проектов.

### **Радиоастрон**

«Радиоастрон» — это астрофизическая космическая обсерватория, обеспечивающая проведение наблюдений внегалактических объектов со сверхвысоким разрешением методами радиоинтерферометрии совместно с сетью наземных радиотелескопов в диапазонах длин волн 1.35—6.0; 18.0 и 92.0 см, а также исследование свойств околоземной и межпланетной плазмы. Запуск космического аппарата намечен на 2007 г. В ФКП как в документе указывается только заказчик (по данным разделам, как правило, Российская академия наук), но указывается конкретная кооперация по отдельным проектам. Мы в этом материале решили дать более подробные сведения о кооперации с тем, чтобы те астрономы и другие специалисты, кто заинтересуется более глубоко и, возможно, даже захочет принять участие в будущем российской космической науки, могли легче ориентироваться. Итак, по проекту «Радиоастрон» головным предприятием космической отрасли России, ответственным за реализацию проекта, является ФГУП «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина», а головное научное учреждение — Астрокосмический центр физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН).

### **Всемирная космическая обсерватория/Ультрафиолет**

Астрофизическая обсерватория, обеспечивающая наблюдения астрономических объектов в наиболее богатом на астрофизическую информацию участке электромагнитного спектра от 100 до 350 нм (запуск в 2010 г, НПО им. С. А. Лавочкина, Институт астрономии РАН — ИНАСАН).

### **Спектр-РГ**

Астрофизическая обсерватория для наблюдений астрономических объектов в рентгеновском и гамма-диапазонах: 0.08 кэВ — 10.0 МэВ (2011 г., НПО им. С. А. Лавочкина, Институт космических исследований РАН — ИКИ РАН).

Все эти перечисленные проекты находятся в продвинутой стадии опытно-конструкторских разработок (ОКР), т. е. по ним в основном уже завершена стадия предварительных оценок и проектирования (так называемая стадия эскизного проекта) и начато непосредственное создание космических комплексов. Кроме того, в ФКП предусмотрено также включение перспективных проектов, выполняемых пока что как научно-исследовательские работы (НИР). К таким проектам по данному разделу относятся:

### **Гамма-400**

Космическая обсерватория, предназначенная для определения природы «темной материи» во Вселенной, развития теории происхождения высокоэнергетичных космических лучей и физики элементарных частиц. Запуск космического аппарата планируется в 2013 г. Исполнитель от космической индустрии будет определяться на конкурсной основе. Головное научное учреждение — Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

### **Миллиметр**

Космическая обсерватория и функционирующий на ее основе интерферометр с угловым разрешением до 30 нс дуги, что обеспечивает получение уникальной информации о глобальной структуре Вселенной; о строении и эволюции галактик, их ядер, звезд и планетных систем, а также об органических соединениях в космическом пространстве, объектах со сверхсильными гравитационными и электромагнитными полями. Запуск космического аппарата намечен на период после 2015 г. Головное научное учреждение — АКЦ ФИАН.

### **Астрометрия**

Космический астрометрический комплекс, обеспечивающий построение фундаментальной системы небесных координат в оптическом диапазоне, измерение параллаксов опорных звезд с точностью до  $10^{-6}$  угловых секунд и решение прикладных задач космической навигации (2018 г., ИНАСАН).

Также запланированы проекты, реализующиеся путем установки комплексов научной аппаратуры, на отечественные космические аппараты, предназначенные для решения других народно-хозяйственных задач.

### **Конус**

Осуществляются взаимосвязанные эксперименты по исследованию всплесков космического гамма-излучения. Первый из экспериментов проводится с ноября 1994 г. на космическом аппарате НАСА «ВИНД» с помощью российской научной аппаратуры «Конус». Эти наблюдения дополнялись экспериментами «Конус» на двух российских околоземных космических аппаратах серии «Космос». Подготавливается аппаратура для третьего аппарата этой серии. Запуск космического аппарата будет осуществлен ориентировочно в 2006 г. С российской стороны партнером является Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.

### **Памела**

Основные задачи проекта — исследование (поиск) антивещества в космических лучах с борта искусственного спутника Земли путем регистрации потоков и спектров антипротонов и позитронов. Поиск ядер атомов антивещества. Запуск этого научного прибора (основной разработчик — Италия) планируется осуществить на аппарате «Ресурс-ДК» в 2006 г. С российской стороны партнером является Московский инженерно-физический институт (государственный университет) — МИФИ.

### **Нуклон**

Исследование химического состава и энергетических спектров космических лучей высоких энергий. Запуск космического аппарата будет осуществлен ориентировочно в 2008 г. (ФИАН).

### **ТУС-М**

Мониторинг земной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне, позволяющий исследовать характеристики космического излучения со сверхвысокими энергиями. Запуск космического аппарата будет осуществлен ориентировочно в 2009 г. (НИИЯФ МГУ).

## **Планетология — исследование планет и малых тел Солнечной системы**

Эти исследования имеют первостепенное значение для понимания процессов возникновения и развития Солнечной системы. Однако прежде всего они дают ключ к познанию возможных путей будущей эволюции нашей собственной планеты, к пониманию того, как сохранить возможность существования жизни на Земле для наших потомков.

Изучение планет, их спутников, астероидов и комет включает в себя поиски жизни или ее следов, а достоверное их обнаружение само по себе явилось бы величайшим научным открытием человечества. Нельзя также забывать о том, что в XXI в. неизбежно последуют пилотируемые полеты к ближайшим телам Солнечной системы. Для их подготовки необходима подробнейшая информация о физических и химических условиях на этих телах. Кроме того, в отдаленной перспективе изучение возможностей искусственного изменения физических условий сначала на поверхности Марса, а потом и Венеры может оказаться необходимым для расселения там наших далеких

потомков. В рамках ФКП для решения задач этого научного направления предусмотрено выполнение следующих проектов.

### **Фобос-Грунт**

Космический комплекс, обеспечивающий впервые в мире доставку образца вещества спутника Марса — Фобоса на Землю для исследования его структуры и физико-химических характеристик, что позволит получить данные о происхождении спутников Марса и взаимодействии малых тел Солнечной системы с солнечным ветром. Помимо решения основной задачи по доставке вещества Фобоса на Землю будут проведены дистанционные исследования Марса. Кроме того, космический аппарат «Фобос-Грунт» послужит основой базовой космической платформы для других проектов, выполняемых в интересах фундаментальных космических исследований. Проект предусматривает создание нового базового космического аппарата с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ). В частности, этот КА предполагается использовать в будущем и для исследования других планет, полетов к астероидам и кометам. Использование ЭРДУ позволит запускать такие аппараты на ракетах-носителях среднего класса типа «Союз-Фрегат» (2009 г., НПО им. С. А. Лавочкина, ГЕОХИ РАН, ИКИ РАН, МАИ).

Другие планетные проекты находятся в стадии НИР.

### **Луна-Глоб**

Это космический комплекс, обеспечивающий: получение научных данных о внутреннем строении Луны и кратера Айткена на южном полюсе Луны; разведку природных ресурсов; исследование воздействий на Луну приходящих корпускулярных потоков и электромагнитного излучения. Запуск космического аппарата намечен на 2012 г. (ГЕОХИ).

### **Венера-Д**

Космический комплекс, обеспечивающий проведение измерений химического состава атмосферы Венеры, съемку поверхности на этапе спуска, определение минерального состава вещества поверхностного слоя, точные измерения температуры и давления, потоков излучения, характеристик аэрозольной среды. Данные о сейсмической активности планеты. Особенностью проекта является сравнительно большой срок работы спускаемого аппарата, что в крайне агрессивных условиях в атмосфере и на поверхности Венеры является сложнейшей технической задачей. Срок активного существования

спускаемого аппарата 30 дней. Срок активного существования орбитального аппарата 3 года. Запуск космического аппарата намечен на 2016 г.

Кроме того, уже проводятся и запланированы на будущее проекты, которые будут реализованы путем установки отечественной научной аппаратуры на зарубежные космические аппараты научного назначения.

Запущенный в апреле 2001 г. космический аппарат НАСА «Марс-Одиссей» ведет научные измерения на орбите вокруг Марса. На его борту установлен российский прибор «ХЕНД». Запущенный в июне 2003 г. космический аппарат ЕКА «Марс-Экспресс» ведет научные измерения на орбите вокруг Марса. На его борту установлено шесть научных приборов, большинство из которых имели свои прототипы на российском космическом аппарате «Марс-96». Российские ученые как соисследователи участвуют во всех научных экспериментах аппарата «Марс-Экспресс». В ноябре 2005 г. запущен космический аппарат ЕКА «Венера-Экспресс». Комплекс его научной аппаратуры практически аналогичен комплексу аппаратуры на космический аппарат ЕКА «Марс-Экспресс». Российские ученые как соисследователи также участвуют во всех научных экспериментах аппарата «Венера-Экспресс».

На будущее планируется установить следующие приборы на борт зарубежных КА.

#### **ЛЕНД**

Российский комплекс научной аппаратуры «ЛЕНД» будет установлен на космический аппарат НАСА «Лунный разведывательный орбитальный аппарат». Целью исследований российского комплекса научной аппаратуры «ЛЕНД» является поиск водяного льда в полярных районах Луны. Запуск космического аппарата НАСА намечен на 2008 г.

#### **ДАН**

Российский научный прибор «ДАН» будет установлен на марсоход НАСА. Основная научная задача прибора «ДАН» — разведка мощности вечной мерзлоты на Марсе. Запуск космического аппарата НАСА намечен на 2009 г.

#### **Участие в проекте Бепи Колombo**

Главная задача проекта — исследование планеты Меркурий с двух выведенных на орбиты вокруг этой планеты космических аппа-

ратов. Роскосмос планирует участвовать в проекте «Беппи Колумбо» совместно с ЕКА и ДЖАКСА путем установки на оба космических аппарата нескольких научных приборов. Запуск перелетного к Меркурию комплексного космического аппарата намечен на 2012 г.

### **Изучение Солнца, космической плазмы и солнечно-земных связей**

Научная значимость исследований Солнца состоит еще и в том, что оно оказывает решающее влияние на основные процессы на Земле, в том числе на некоторые технические системы. Такое воздействие сказывается на работе различных радиосистем, энергосетей, проводных линий связи в Арктике, на интенсивности индуцированных электрических токов в трубопроводах и т. д. В качестве примера можно привести два известных случая выхода из строя протяженных энергосетей: 13 марта 1989 г. при резкой вспышке магнитных вариаций наведенный электрический ток в энергосистеме Hydro-Quebec в Канаде достиг 100 А, что вывело эту систему из строя. Это надолго оставило без энергии большой район с населением в несколько миллионов человек. Аналогичные случаи были и в нашей Арктике, например 11–12 февраля 1958 г. на Кольском полуострове. Для нефтепроводов наведенные в них электрические токи, замыкаясь на землю, резко усиливают коррозию, а искрение может приводить к пожарам в местах утечек. Серьезность проблемы лишним раз была продемонстрирована и полным выходом из строя телевизионного ретрансляционного спутника «Telstar-401», произошедшим 11 января 1998 г. в результате его усиленного облучения энергичными частицами. Постепенно углубляются наши знания о том, что проявления солнечной активности оказывают сильное влияние и на организм человека. Развивается служба медицинского предупреждения о возникновении геомагнитных бурь, вызванных солнечной активностью.

В рамках Федеральной космической программы России на период 2006–2015 гг. в разделе «Космические средства для фундаментальных космических исследований» для решения задач этого научного направления предусмотрено выполнение следующих проектов.

#### **КОРОНАС-Фотон**

КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца) — Российская программа исследования физики Солнца и солнечно-земных связей с помощью серии космиче-

ских аппаратов, которая предусматривает запуск на околоземную орбиту трех солнечно-ориентированных спутников. «КОРОНАС-Фотон» — третий аппарат в этой серии. Двумя другими спутниками программы являются «КОРОНАС-И» (запущен 2 марта 1994 г.) и «КОРОНАС-Ф» (запущен 31 июля 2001 г., завершил работу в 2005 г.). Главной задачей «КОРОНАС-Фотон» является проведение комплексных наблюдений Солнца, изучение процессов накопления энергии и ее трансформации в ускоренные частицы во время солнечных вспышек с целью мониторинга «космической погоды» и выработки мероприятий по парированию негативного влияния на здоровье человека. Запуск космического аппарата намечен на 2007 г. Головной организацией по космическому аппарату «КОРОНАС-ФОТОН» является Научно-исследовательский институт электромеханики — НИИЭМ, головная организация по комплексу научной аппаратуры — МИФИ.

### **Резонанс**

Космический комплекс, обеспечивающий проведение исследований параметров процессов распространения низкочастотных волн в магнитоактивной плазме магнитосферы Земли, изучения механизмов резонансного взаимодействия волн и частиц в околоземном космическом пространстве, регистрируемых с помощью наземного нагревного коротковолнового стенда и искусственного спутника Земли. Результаты контроля техногенных воздействий на магнитосферу Земли и геофизические процессы (2012 г., ИКИ РАН).

На стадии НИР в этом разделе находятся следующие проекты.

### **Интергелиозонд**

Космический комплекс для проведения исследований параметров электромагнитного излучения Солнца с близких расстояний (30–40 радиусов Солнца) с высокой чувствительностью и разрешением в оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах, а также параметров солнечного ветра для решения проблем разогрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, происхождения солнечных вспышек и коронарных выбросов плазмы (2014 г., ИЗМИРАН).

### **ТЕРИОН-Ф2**

Космический комплекс, обеспечивающий получение результатов исследований параметров ионосферы и термосферы, а также механизмов, формирующих термосферные и ионосферные связи в плане-

тарном масштабе на основе прямых и дистанционных методов измерений с борта низкоорбитального космического аппарата на высоте 300 км (2018 г., головная организация определяется на конкурсной основе).

## **Исследования в областях космической биологии, физиологии и материаловедения**

Изучение воздействия невесомости на живые организмы и физиологических механизмов адаптации к ней в космических полетах, а также изучение комбинированного действия невесомости и других факторов имеют огромное значение для длительных полетов человека, столь необходимых для освоения планет Солнечной системы. В рамках ФКП в разделе «Космические средства для фундаментальных космических исследований» запланировано продолжение программы «Бион».

### **Бион-М**

Космический комплекс, обеспечивающий исследование параметров физиологического состояния биологических объектов под воздействием факторов космического пространства в течение орбитального полета до 45 суток с целью эффективного медико-биологического обеспечения длительных пилотируемых полетов в космосе. Запуски космических аппаратов «Бион-М» намечены на 2010, 2013 и 2016 гг.

Использование космических средств для решения задач космического материаловедения позволяет получать в условиях микрогравитации образцы материалов, обладающих уникальными свойствами по сравнению с земными аналогами.

Такие исследования проводятся на автоматических космических аппаратах типа «Фотон». Их результатами явилось получение фундаментальных знаний о влиянии невесомости на процессы переноса тепла и массы в веществах, находящихся в жидком фазовом состоянии, и роста в их толще кристаллов. Исследовано воздействие на эти процессы постоянного и переменного магнитных полей. Поставлены серии экспериментов по электрофоретическим разделениям и очисткам биологически активных веществ, а также ионообменной диффузии в условиях невесомости.

В рамках ФКП в разделе «Космические средства технологического назначения» запланировано выполнение следующих проектов.

### **Фотон-М**

Космический комплекс для проведения в условиях микрогравитации исследований в области космической технологии и биотехнологии. Он предназначен для обеспечения получения новых знаний по физике невесомости; отработанных технологических процессов производства полупроводниковых материалов, биомедицинских препаратов (при уровне микрогравитации  $2\Delta 10^{-6}g$ ) с улучшенными характеристиками. Срок активного существования космического аппарата на орбите 30 суток. Запуски космических аппаратов намечены на 2006 и 2008 гг.

### **Возврат-МКА**

Принципиально новый космический комплекс с возвращаемым космическим аппаратом для проведения микрогравитационных экспериментальных исследований. Он предназначен для обеспечения получения фундаментальных знаний о процессах, проходящих в расплавах и растворах, а также в биологических структурах в условиях сверхнизких (ниже  $10^{-7}g$ ) уровней микрогравитации в целях их последующего использования при организации промышленного производства новых материалов и биопрепаратов как на Земле, так и с использованием космического комплекса «ОКА-Т-МКС». Срок активного существования космического аппарата на орбите 1 год. Запуск космического аппарата намечен на 2014 г.

Важная роль в ФКП также отводится использованию унифицированной платформы «Солнечный парус» для малоразмерных космических аппаратов, уже разработанной за счет внебюджетных средств в НПО им. С. А. Лавочкина, малоразмерных КА, запускаемых конверсионными ракетами-носителями для решения задач фундаментальных космических исследований. В рамках российского проекта «Малые космические аппараты для фундаментальных космических исследований» (МКА-ФКИ) планируется пять запусков таких космических аппаратов в 2008, 2010, 2012, 2014 и 2016 гг. Они обеспечат получение результатов в рамках гибкой программы исследований солнечно-земных связей, наблюдений малых тел Солнечной системы, экспериментов в области астрофизики.

В заключение хочется пригласить исследователей, особенно молодых, участвовать в осуществлении Российской программы фундаментальных космических исследований. У космической науки в России есть будущее.

А. М. Соболев<sup>1</sup>, А. Б. Островский<sup>1</sup>, М. С. Кирсанова<sup>1</sup>,  
О. В. Шелемей<sup>1</sup>, М. А. Воронков<sup>2</sup>, А. В. Малышев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Уральский государственный университет  
<sup>2</sup>ATNF CSIRO, Sydney, Australia

## МЕТАНОЛЬНЫЕ МАЗЕРЫ И ПРОЦЕССЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

### Введение

Метанольные мазеры традиционно разделяют на два класса. Хотя мазеры обоих классов часто сосуществуют в одной области звездообразования, их положения в объекте, как правило, значительно различаются. Мазеры II класса формируются в окрестностях массивных молодых звездных объектов (МЗО), в то время как мазеры I класса предположительно отслеживают более удаленные части истечений из этих МЗО.

Метанольные мазеры II класса проявляются в чрезвычайно ярких линиях излучения, соответствующих переходам с частотами 6.6 и 12.1 ГГц [11]. В нескольких источниках зарегистрировано менее яркое излучение в более чем двух десятках других, более слабых мазерных переходах (см., например, [19]). В настоящее время существует три объединенных каталога метанольных мазеров II класса, содержащих данные о более 500 объектов [10], [28] и [14] и ссылки на исходные данные. Отличительной особенностью каталога [10] является то, что он содержит данные о нескольких мазерных переходах и ссылки на данные о молекулярных трассерах ударных волн. Большинство мазерных источников II класса найдено в направлениях на IRAS источники. В то же время слепые обзоры (полное картографирование избранных областей) позволили обнаружить несколько мазеров в направлениях, где отсутствуют другие признаки активных процессов звездообразования. В настоящее время метанольные мазеры II класса найдены только в областях образования массивных звезд [13].

Метанольные мазеры I класса слабее и не так широко распространены. Большинство из них найдено в окрестностях мазеров II

класса (см., например, [15] и [5]). Были проведены масштабные поиски мазерных источников I класса (например, [15] и [24]) в областях звездообразования, но объединенные каталоги этих объектов не опубликованы и слепые обзоры не выполнялись.

## Определение параметров областей массивного звездообразования

### Метанольные мазеры I класса

Первыми метанольными мазерами, обнаруженными в межзвездной среде, были переходы серии  $J_2 - J_1E$  с частотами, близкими к 25 ГГц. Яркое излучение в соответствующих линиях было зарегистрировано в знаменитом объекте ОМС-1 — молекулярном облаке в Орионе. Наличие интерферометрических данных с высоким угловым разрешением [9] позволило оценить характеристики турбулентности в этом источнике методом прямого моделирования [20, 21].

Анализ существующих наблюдательных данных о метанольных мазерах I класса позволяет выделить четыре режима, отличающихся серийей переходов, в которой образуется самая яркая (в терминах яркостной температуры) линия.

Самый распространенный мазерный режим, вероятно, тот, в котором ярчайшие линии принадлежат серии  $J_{-1} - (J - 1)_0E$ . Переходы  $4_{-1} - 3_0E$  на 36.1 ГГц и  $5_{-1} - 4_0E$  на 84.5 ГГц являются слабыми мазерами при условиях, обычных для областей массивного звездообразования. Мазерный характер излучения в линиях при этом режиме, как правило, трудно подтвердить наблюдательно. Тем не менее есть источники, в которых профили линий содержат узкие пики и мазерная природа излучения доказана путем интерферометрических наблюдений с высоким угловым разрешением. Мазерные источники в молекулярных облаках Sgr B2, G30.8-0.1, и G1.6-0.025 можно рассматривать в качестве представителей этого мазерного режима [17].

В другом мазерном режиме самыми яркими становятся линии, соответствующие переходам серии  $J_0 - (J - 1)_1A^+$ . Многочисленные источники светятся в несомненно мазерных линиях, возникающих при переходах  $7_0 - 6_1A^+$  и  $J_0 - (J - 1)_1A^+$  на частотах 44.1 и 95.2 ГГц соответственно. Этот режим представляют мазеры в источниках DR21W, NGC2264 и ОМС-2 [11]. Предварительный теоретический анализ накачки показывает, что линии серии  $J_0 - (J - 1)_1A^+$  становятся наиболее яркими в моделях с довольно высокой направ-

ленностью излучения ( $> 20$ ) и умеренными удельными лучевыми концентрациями (Островский, Соболев, Воронков, см. тезисы представленные на с. 276).

*Рис. 1.* Спектры и карты метанольных мазеров I класса на 9.9 и  $\sim 25$  ГГц в G343.12-0.06. Контуры на карте —  $(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) \times 0.9$  Ян/диагр

Следующий мазерный режим менее распространен и представлен источниками, в которых самыми яркими являются линии серии  $J_2 - J_1E$  с частотами, близкими к 25 ГГц. ОМС-1 — самый известный из этих источников [9]. Несколько других ярких источников было зарегистрировано в прошлом году [27]. Линии этой серии стано-

вятся самыми яркими в моделях с высокими удельными лучевыми концентрациями ( $\lg(N_{CH_3OH}/\Delta V \text{ [cm}^{-3}\cdot\text{c]}) \geq 12$ ), требуют относительно высоких температур ( $T_k = 75 - 100 \text{ K}$ ) и плотностей ( $\lg(n_H \text{ [cm}^{-3}\text{]}) = 5 - 7$ ).

Существование четвертого мазерного режима с самой яркой линией на 9.9 ГГц из серии  $J_{-2} - (J-1)_{-1}E$  было установлено только в прошлом году. Наблюдения на радиоинтерферометре АТСА в Австралии показали, что этот режим фактически реализуется в источниках W33A и G343.12-0.06 (см. рис. 1). Предварительное моделирование показывает, что линия  $9_{-2} - 8_{-1}E$  на 9.9 ГГц становится наиболее яркой в моделях с удельной лучевой концентрацией столь же высокой, как в предыдущем режиме, но предпочитает большую направленность излучения и либо более низкую плотность, либо более высокую температуру ( $T_k > 100 \text{ K}$ ).

Таким образом, метанольные мазеры I класса — потенциально хорошие источники информации о таких физических параметрах, как температура, плотность и лучевая концентрация.

### Метанольные мазеры II класса

И наблюдения, и моделирование метанольных мазеров II класса показывают, что линия  $5_1 - 6_0A^+$  на 6.6 ГГц всегда имеет самую высокую яркостную температуру [10, 18]. Наблюдения свидетельствуют о том, что существенные отличия в положениях мазерных пятен различных переходов отсутствуют (см., например, [12, 22]). Таким образом, есть только один известный режим накачки мазеров II класса. Тем не менее отношения яркостей различных мазерных линий значительно зависят от значений физических параметров. Это позволяет определять физические параметры в отдельных источниках (на основе наблюдений во многих переходах, например, [22, 3]) и делать заключения о параметрах «обычных» метанольных мазерных источников II класса (на основе обширных обзоров, например, [2] и [6]). Результаты таких исследований обобщены в [19] и [4] и здесь рассматриваться не будут.

Различия в чувствительности яркостей мазеров к изменениям физических параметров позволяют объяснить природу их временной переменности и оценить физические параметры в источниках путем моделирования данных о переменности в различных мазерных линиях. Интерференционные наблюдения переменности источника G9.62+0.20 показывают, что изменения яркости в различных

частях источника синхронизированы со скоростью света ([8]). В этом случае переменность наиболее вероятно вызвана вариациями температуры пыли, которые связаны с изменениями яркости центрального молодого звездного объекта, отражающими характер аккреционного процесса (Goedhart, Соболев, Островский и др., см. тезисы, представленные на с. 265).

## **Некоторые вопросы статистики метанольных мазеров**

### **Распределение метанольных мазеров в Галактике**

Обширные обзоры показывают, что лучевые скорости метанольных мазеров II класса обычно совпадают со скоростями связанных с ними молекулярных ядер с точностью до нескольких км/с (см., например, [10, 16] и [23]). Это дает возможность проведения оценок расстояний до этих источников на основе моделей кривых вращения газа в Галактике. В результате получают так называемые кинематические расстояния. Полученные с их использованием распределения метанольных мазерных источников II класса в Галактике рассматривались рядом авторов (см., например, [25, 16] и [14]). Нужно отметить, что для большинства источников кинематические оценки неоднозначны и для них существуют два формально равноправных решения: «ближнее» и «дальнее». Тем не менее твердо установлено, что большинство метанольных мазерных источников II класса расположено в молекулярном кольце Галактики.

Рассмотрим вопрос о статистической значимости неоднозначности кинематических расстояний. Конечно, иногда «ближняя» оценка лучше соответствует реальному расстоянию до источника, а иногда «дальняя» оценка является более реалистичной. Все же предельные случаи, вероятно, могут вести к верным заключениям. Это разумно, потому что в «виде сверху» на распределение мазеров заметен промежуток в концентрациях мазерных источников, соответствующих «ближним» и «дальним» оценкам расстояний.

Сначала мы предположили, что правильной является «дальняя» оценка кинематического расстояния. Обнаружилось, что в этом случае зависимость средней яркости мазеров от расстояния до Солнца нерегулярна и показывает тенденцию к увеличению, когда расстояния превышают 5 кпк. Такая зависимость, конечно, нефизична.

Затем мы рассмотрели зависимость средней яркости мазеров от расстояния до Солнца для совокупности «ближних» оценок расстояния. В этом случае есть явная тенденция уменьшения с расстоянием от Солнца. Принимая во внимание, что слабые мазеры на больших расстояниях не видны из-за ограниченной чувствительности обзоров, мы получили зависимость, которая близка к естественной, то есть к уменьшению яркости пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Таким образом, статистические выводы, построенные на «ближних» оценках кинематических расстояний, должны хорошо соответствовать действительности [29].

В соответствии с этой гипотезой мы построили зависимость числа метанольных мазерных источников II класса от расстояния до центра Галактики, показанную на рис. 2. На этой зависимости хорошо выделяются пики, соответствующие галактоцентрическим расстояниям до спиральных рукавов в окрестности Солнца. Рассмотрение эффектов селекции, связанных с ограниченной чувствительностью обзоров, не меняет положений пиков в распределении мазеров.

Статистика показывает, что время жизни метанольных мазеров сравнительно короткое и составляет около 10 тыс. лет (см., например, [26] и [23]). Следовательно, мазерные источники — хорошие трассеры областей раннего массивного звездообразования, которые, вероятно, концентрируются в спиральных рукавах. Полученная корреляция пиков распределения мазеров с положениями спиральных рукавов показывает, что мазеры являются многообещающим инструментом для изучения структуры нашей Галактики.

Мы также построили функцию светимости метанольных мазеров на 6.6 ГГц с использованием «ближних» оценок кинематических расстояний. Обнаружено, что в количественном отношении существенно доминируют мазеры низкой яркости. Это означает, что будущие обзоры с повышенной чувствительностью должны значительно увеличить число известных источников мазерного излучения метанола на 6.6 ГГц. Стоит отметить, что поиски в направлениях вдоль спиральных рукавов — наиболее многообещающие в смысле обнаружения новых источников, но дают меньше информации для изучения структуры Галактики.

### **Статистика и зоны формирования мазеров**

Используя объединенный каталог, мы изучили статистику отношений яркости в различных мазерных линиях, а также соотношения

*Рис. 2.* Гистограмма распределения мазеров метанола в линии  $5_1 - 6_0A^+$  в зависимости от расстояния до Галактического Центра

диапазона скоростей мазерных деталей и ширин таких молекулярных трассеров ударных волн, как линии  $CS$  и  $SiO$  [10]. Показано что яркость мазера определяется параметрами некоторой выделенной части объекта — зоны формирования мазера; физические условия в пределах зоны формирования обычных мазерных источников значительно изменяются; метанольные мазеры II класса формируются в областях, подверженных воздействию ударных волн.

### **Сравнение скоростей метанольных мазеров со скоростями плотного газа, полученными по линии $CS(2-1)$**

Рассмотрим соотношение между усредненной скоростью движений в зоне формирования мазера и скоростью плотного газа в окружающем облаке. Наблюдения показывают, что скорости самых ярких пиков в различных мазерных линиях часто не совпадают [1, 10] и относительная яркость пиков изменяется со временем [7]. В этой ситуации усредненной скорости движений в зоне формирования мазера больше соответствует центр диапазона скоростей мазерных деталей. Это должно быть верно в случае, когда источник достаточно яркий.

Чтобы получить данные о скоростях линии  $CS(2-1)$  в направлениях на наиболее яркие мазерные источники, мы выполнили наблюдения 31 объекта, используя радиотелескоп Морга в Австралии. Это позволило нам сделать 18 новых обнаружений и улучшить качество

ранее наблюдавшихся спектров. В результате мы получили точные скорости линии  $CS(2-1)$  для фактически всех мазерных источников с плотностью потока на 6.6 ГГц, превышающей 150 Ян.

*Рис. 3.* Положения мазерных источников с голубым смещением (черные круги) и красным смещением (белые круги) на диаграмме  $l-V_{lsr}$ . На фоне показано распределение яркости излучения в линии  $CO$

Мы предполагали, что скорость мазера смещена значительно, если центр диапазона скоростей мазерных деталей отличается от скорости центра линии  $CS(2-1)$  больше, чем на 0.75 км/с. Обнаружено, что отличие количества мазеров с красным смещением от количества мазеров с голубым смещением статистически незначимо. Однако, пространственные распределения мазерных источников с различным направлением смещения отличаются значительно. На рис. 3 показано, что мазерные источники с голубым смещением в интервале галактических долгот от  $320$  до  $350^\circ$  образуют выделяющуюся группу, расположенную в районе спирального рукава Щита-Центавра. Это, вероятно, отражает наличие крупномасштабной упорядочен-

ности, то есть группировки источников с похожими особенностями морфологии или близкими стадиями эволюции области массивного звездообразования.

## Заключение

Мы показали, что метанольные мазеры представляют мощный диагностический инструмент для изучения природы областей массивного звездообразования и их распределения в Галактике.

Российские соавторы поддержаны Минобрнауки РФ в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (раздел № 3.3, проект 65624) и РФФИ (грант 03-02-16433).

## Список литературы

1. *Caswell J. L., Vaile R. A., Ellingsen S. P. et al.* // MNRAS. 1995. Vol. 274. P. 1126.
2. *Cragg D. M., Sobolev A. M., Caswell J. L. et al.* // Ibid. 2004. Vol. 351. P. 1327.
3. *Cragg D. M., Sobolev A. M., Ellingsen S. P. et al.* // Ibid. 2001. Vol. 323. P. 939.
4. *Cragg D. M., Sobolev A. M., Godfrey P. D.* // Ibid. 2005. Vol. 360. P. 533.
5. *Ellingsen S. P.* // Ibid. 2005. Vol. 359. P. 1498.
6. *Ellingsen S. P., Cragg D. M., Lovell J. E. J. et al.* // Ibid. 2004. Vol. 354. P. 401.
7. *Goedhart S., Gaylard M. J., van der Walt D. J.* // Ibid. 2004. Vol. 355. P. 553.
8. *Goedhart S., Minier V., Gaylard M. J. et al.* // Ibid. 2005. Vol. 356. P. 839.
9. *Johnston K. J., Gaume R., Stolovy S., et al.* // ApJ. 1992. Vol. 385. P. 232.
10. *Malyshev A. V., Sobolev A. M.* // A&ATr. 2003. Vol. 22. P. 1.
11. *Menten K. M.* // ApJ (Letters). 1991. Vol. 380. L. 75.
12. *Menten K. M., Reid M. J., Pratap P. et al.* // Ibid. 1992. Vol. 401. L. 39.

13. *Minier V., Ellingsen S. P., Norris R. P. et al.* // A&A. 2005. Vol. 403. P. 1095.
14. *Pestalozzi M., Minier V., Booth R.* // Ibid. 2005. Vol. 432. P. 737.
15. *Slysh V. I., Kalenskii S. V., Val'tts I. E. et al.* // MNRAS. 1994. Vol. 268. P. 464.
16. *Slysh V. I., Val'tts I. E., Kalenskii S. V. et al.* // A&AS. 1999. Vol. 134. P. 115.
17. *Sobolev A. M.* // ASP Conf. Ser. 1996. Vol. 102. P. 68.
18. *Sobolev A. M., Cragg D. M., Godfrey P. D.* // MNRAS. 1997. Vol. 288. P. 39.
19. *Sobolev A. M., Ostrovskii A. B., Malyshev A. V. et al.* // ASP Conf. Ser. 2002. Vol. 206. P. 179.
20. *Sobolev A. M., Wallin B. K., Watson W. D.* // ApJ. 1998. Vol. 498. P. 763.
21. *Sobolev A. M., Watson W. D., Okorokov V. A.* // Ibid. 2003. Vol. 590. P. 333.
22. *Sutton E. C., Sobolev A. M., Ellingsen S. P. et al.* // Ibid. 2001. Vol. 554. P. 173.
23. *Szymczak M., Pillai T., Menten K. M.* // A&A. 2005. Vol. 434. P. 613.
24. *Val'tts I. E., Ellingsen S. P., Slysh V. I. et al.* // MNRAS. 2000. Vol. 317. P. 315.
25. *van der Walt D. J.* // A&A. 1997. Vol. 322. P. 307.
26. *van der Walt D. J.* // MNRAS. 2005. Vol. 360. P. 153.
27. *Voronkov M. A., Sobolev A. M., Ellingsen S. P. et al.* // Ap&SS. 2005. Vol. 295. P. 217.
28. *Xu Y., Zheng X.-W., Jiang D.-R.* // ChJAA. 2003. Vol. 3. P. 49.
29. *Шелемей О. В., Островский А. Б., Соболев А. М. и др.* Исследование статистических свойств мазеров метанола II класса // Физика Космоса: Тр. 34-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2005 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. С. 242.

## СЕЙСМОЛОГИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

### Введение

Гелиосейсмология, возникшая около 35 лет назад и бурно развивающаяся в настоящее время, исследует физические параметры внутренних слоев Солнца на основе изучения глобальных мод акустических колебаний, наблюдаемых в солнечной фотосфере [1]. Этими же методами может исследоваться и строение солнечных слоев, расположенных под локальными структурами в атмосфере Солнца (активные области и даже отдельные крупные солнечные пятна). Это направление называют локальной гелиосейсмологией в отличие от глобальной гелиосейсмологии, занимающейся проблемой строения Солнца в целом [1, 2].

Вместе с тем наблюдения в ультрафиолете на космических аппаратах (TRACE и др.) поперечных колебаний корональных петель породили новое направление солнечной физики — сейсмологию солнечной короны, позволяющую диагностировать параметры корональной плазмы по характеристикам наблюдаемых в корональных структурах уже не акустических, а разнообразных МГД-колебаний. Это направление, по существу применяемых методов, можно также назвать одним из разделов локальной гелиосейсмологии [3–8].

Аналогично этому существует другое направление локальной гелиосейсмологии — пятенная сейсмология, целью которой является диагностика свойств солнечных пятен и окружающих их областей по характеристикам наблюдаемых в солнечных пятнах колебаний [9–13].

В свою очередь, пятенную сейсмологию можно разделить на два направления:

1. Сейсмология солнечных пятен на базе исследований наблюдающихся в них звуковых и магнитозвуковых (но модифицированных гравитацией) короткопериодических (3–5-минутных) колебаний.
2. Сейсмология пятен на основе долгопериодических (от 20–30 мин до нескольких суток) колебаний пятен, физическая природа которых будет обсуждаться ниже.

По первому из указанных направлений пятенной сейсмологии в последние десятилетия проведено очень большое количество исследований. (Одними из первых колебания в пятнах исследовали сотрудники ИЗМИРАНа [14]. Для ознакомления с соответствующей литературой можно использовать известный обзор [15]. Заметим также, что весь 192-й том *Solar Physics* был посвящен гелиосейсмологии и, в частности, сейсмологии солнечных пятен [16]. Сошлемся также на последнюю работу В. И. Жукова [17], в которой подведен определенный итог в исследованиях по данному направлению).

Теоретической основой диагностики здесь является модель пятна в виде вертикальной однородной по радиусу и высоте магнитной силовой трубки. В рамках такой предельно упрощенной геометрии магнитного поля пятна при соответствующем вертикальном профиле температуры удается получить основной эффект — 3- и 5-минутные колебания, обусловленные прохождением через наблюдаемые слои (тень пятна) замедленных магнитозвуковых волн. При попытке рассмотреть более реалистичную неоднородную структуру магнитного поля пятна картина МГД-колебаний становится слишком сложной и практически недоступна качественному анализу [15].

Мы сосредоточим свое внимание на втором из указанных направлений — на исследовании свойств пятен по их собственным долгопериодическим колебаниям.

Имеются в виду прежде всего торсионные (крутильные) колебания пятен с периодами до нескольких суток, а также смещения пятен вдоль меридионального и широтного направлений, носящие колебательный характер (с периодами примерно 1–2 ч и 3–8 суток). Затем следуют колебания магнитного поля и лучевых скоростей в пятнах, регистрируемые на уровне фотосферы оптическими методами, а также колебания интенсивности поляризованного радиоизлучения источников над пятнами, которые регистрируются радиогелиографами. Последние два вида колебаний (с периодами от 20 мин до нескольких часов) являются отражением одного и того же физического процесса: вертикально-радиальных смещений всего пятна (четко локализованного и структурированного объекта) как целого около некоторого положения равновесия. Эти колебания позволяют независимо получать детальную информацию о строении солнечных пятен, в частности, определять магнитную шкалу высоты в пятне, глубину вильсоновской депрессии, а также нижнюю границу пятна — уровень, начиная с которого магнитная силовая трубка пятна начинает резко расширяться книзу.

Первые работы в этом направлении были проведены пулковскими астрофизиками в 80–90-х гг. [18–29], и в настоящее время они приобрели особую актуальность в связи с новыми возможностями современных радиогелиографов, в частности, радиогелиографа Нобейма, дающего с высоким пространственным разрешением двумерные изображения Солнца в полной интенсивности и круговой поляризации на волне 1.76 см [30, 31].

Таким образом, предлагается развить, по существу, новый раздел локальной гелиосейсмологии: сейсмологию солнечных пятен на базе долгопериодических (от 20 мин до нескольких суток) колебаний различных типов, регистрируемых в солнечных пятнах несколькими независимыми методами.

## Основные моды долгопериодических колебаний солнечных пятен

Остановимся подробнее на анализе основных типов долгопериодических колебаний, наблюдаемых в солнечных пятнах различных размеров и типов различными независимыми методами и на различных инструментах.

1. Крутильные моды — регистрируются дифференциальные смещения (повороты) пятен на уровне фотосферы по фотогелиограммам высокого качества. Периоды регистрируемых колебаний — от десятков минут и часов до нескольких суток [29, 32–35].

2. Колебательные движения пятен вдоль солнечного меридиана и вдоль солнечной широты — регистрируются абсолютные величины смещений пятен на уровне фотосферы по фотогелиограммам высокого качества. Измерения здесь проводились с «астрометрической точностью», составлявшей около 0.05 гелиографического градуса, благодаря учету всех возможных инструментальных погрешностей, возникающих при такого рода абсолютных измерениях [24, 26]. Периоды регистрируемых колебаний — 1–2 ч, причем периоды широтных колебаний систематически несколько меньше, чем периоды квазипериодических смещений вдоль меридиана.

3. Вертикально-радиальные смещения плазмы в тени солнечных пятен — регистрируются четырьмя независимыми способами:

- по временным вариациям напряженности магнитного поля пятен, измеряемого по зеemanовскому расщеплению линий в спек-

тре тени пятна [23, 25, 27]. Периоды выявляемых при этом колебаний — от 20 мин до нескольких часов;

- по вариациям магнитного поля и лучевых скоростей в пятнах, наблюдаемых с помощью видеоманитографа, снабженного CCD-системой регистрации солнечного спектра. Видеоманитограф разработан в 1995—1997 гг. в Пулковке и установлен на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 [36—38]. Периоды обнаруживаемых такими методами колебаний — от 3—5 мин до 1—3 ч;
- по изменению интенсивности поляризованного излучения радиоисточников над солнечными пятнами. Выявление колебаний происходит, в частности, при обработке методами вейвлет-анализа двумерных синтезированных изображений, которые дает радиогелиограф Нобеяма на волне 1.76 см [30, 31, 39]. Периоды получаемых колебаний — от 3—5 мин до нескольких часов;
- по временным вариациям площади тени пятна (или площади всего солнечного пятна с полутенью) [40].

Следует особо подчеркнуть, что и для второго и третьего типа описанных колебаний характерно, кроме указанных периодов в десятки минут и часы, также наличие колебательных процессов с периодом в несколько суток [26, 40], что, по-видимому, связано с наложением на эти моды значительно более медленных торсионных мод.

### **Проблема выбора модели и модель «мелкого» солнечного пятна**

Как уже отмечалось во введении, сейсмологию солнечных пятен, рождение которой было анонсировано еще в 1982 г. Томасом, Крамом и Нэем [9], обычно связывают с исследованием поведения 3- и 5-минутных осцилляций, наблюдаемых в тени солнечных пятен. При этом в качестве модели пятна берется вертикальная цилиндрическая магнитная силовая трубка с одной компонентой поля. В этом случае система линеаризованных уравнений МГД значительно упрощается и исследователи получают возможность решить задачу о собственных колебаниях такой трубки или же рассматривать ее в качестве своеобразного фильтра, выделяющего из всего спектра МГД-колебаний лишь отдельные моды с определенными частотами

и волновыми числами. Оба этих подхода, как показал Жуков [17], эквивалентны, и природа 3–5-минутных колебаний в тени пятна состоит, по-видимому, в том, что мы наблюдаем прохождение через атмосферу пятна замедленных (а не ускоренных, как считалось раньше во многих работах) магнитозвуковых волн.

Простая модель пятна в виде однородной цилиндрической трубки удобна с математической точки зрения, поскольку позволяет строго поставить задачу на собственные колебания системы и детально исследовать ее колебательные свойства, но она не отражает существенных признаков солнечного пятна (не содержит необходимых для описания реальной системы «параметров порядка») и потому не может служить основой для физической диагностики его свойств. Впрочем, даже в рамках такой очень простой модели пятна взаимодействие различных МГД-мод в тени пятна дает настолько сложную картину, что ситуация, как пишет Bogdan в обзоре [15], напоминает положение слепых мудрецов, ощупывающих слона с разных сторон, пытаясь понять, как он устроен.

В свое время Б. Б. Кадомцев [41] подчеркивал, что при исследовании устойчивости и колебательных свойств магнитоплазменных систем исследователи всегда сталкиваются с альтернативой:

- 1) выбрать предельно простое начальное равновесие и тогда строго решить задачу о собственных колебаниях, найти все собственные частоты, построить дисперсионные кривые для каждой моды и получить полную картину малых колебаний системы;

- 2) выбрать более реалистичную и, следовательно, более сложную структуру начального равновесного состояния. При этом, как правило, не удастся из-за чисто математических трудностей поставить точно задачу о собственных колебаниях системы и придется использовать приближенный энергетический метод ее описания, используя некоторые интегральные характеристики системы, например усреднение по сечению [42].

Нам представляется, что ставить задачу диагностики свойств солнечных пятен на основе только анализа короткопериодических 3–5-минутных осцилляций в тени пятен и предельно простой модели с одной компонентой магнитного поля не имеет смысла по ряду причин.

1. Исходное равновесие (однородная магнитная силовая трубка с одной компонентой поля) чрезвычайно идеализированно и очень далеко отстоит от реальной пятенной конфигурации, характеризующейся большим вертикальным градиентом магнитного поля и значи-

тельным понижением уровня тени пятна по отношению к фотосфере (вильсоновская деперссия).

2. Взаимодействие собственных колебательных мод в магнитной силовой трубке пятна даже при простой геометрии поля создает настолько разнообразную и подвижную картину, что выделить основной эффект очень сложно [15], а при попытках рассмотреть более реалистичную структуру магнитного поля пятна картина МГД-колебаний резко усложняется и практически уже не поддается никакому анализу.

3. В рамках модели однородной магнитной трубки природа реально существующих долгопериодических колебаний пятен остается совершенно непонятной. В том же обзоре [15] хотя и упоминается несколько наблюдательных работ, в которых сообщается о колебаниях с периодами, превышающими 5 мин, но даже не указывается, о каких, собственно, значениях периодов идет речь и тем более не обсуждается физическая природа таких осцилляций. По поводу крутильных колебаний пятен просто высказывается сомнение в их реальности.

Таким образом, мы можем резюмировать, что ограничиться в диагностике солнечных пятен исследованием только короткопериодической частью спектра их собственных колебаний нельзя. Нельзя также и далее оставаться в рамках слишком простой модели солнечного пятна в виде вертикальной однородной магнитной силовой трубки. Такая слишком упрощенная модель пятна не позволяет получить ответы на самые простые фундаментальные вопросы теории солнечных пятен. А именно:

1) почему никогда не наблюдается пятен с напряженностью меньшей примерно 0.8–1 кГс и большей 5–6 кГс? Иначе говоря, почему только в этом диапазоне напряженностей равновесие силовой трубки пятна оказывается устойчивым?

2) почему гистограмма распределения пятен по  $H$  имеет максимум около 2 кГс?

3) солнечные пятна — четко локализованные и структурированные по радиусу и глубине объекты, резко выделяющиеся на фоне окружающей их фотосферы. Пятна существуют достаточно долго, следовательно, их равновесие механически устойчиво. Значит, должны наблюдаться глобальные собственные колебания пятна, при ко-

торых сохраняется его общая структура, т. е. должны иметь место колебания пятна как целого около некоторого исходного положения равновесия?

4) каковы характерные периоды такого рода колебаний, чем они определяются? Как зависят, в частности, частоты этих глобальных колебаний от размера (или магнитного потока) пятна и от напряженности его магнитного поля?

Очевидно, что модель однородного вертикального цилиндра в поисках ответов на поставленные здесь вопросы помочь никак не может — для однородной вертикальной трубки все равновесия возможны и «равноправны» в смысле энергетики. Следовательно, она в принципе не может служить основой для физической диагностики солнечных пятен.

Исходное равновесие солнечного пятна, относительно которого совершаются колебания, регистрируемые указанными выше различными методами, должно быть описано более сложной и более реалистичной моделью, способной дать однозначные, простые с физической точки зрения ответы на поставленные выше основные вопросы, без решения которых природу солнечных пятен вообще нельзя считать понятой.

Метод решения задачи о колебаниях достаточно сложной магнитоплазменной системы в целом должен опираться на хорошо отработанные в физике лабораторной плазмы интегральные энергетические представления [40, 41], а не на задачу о собственных колебательных модах однородного прямого цилиндра.

Разработка энергетических моделей солнечных пятен, способных дать ответ на фундаментальные вопросы физики солнечных пятен, понять причину устойчивости их равновесий в узком диапазоне напряженностей магнитного поля, начата нами более 30 лет назад [18, 19].

Еще в 1984 г. [20] на основе анализа крутильных колебаний в биполярной паре пятен по периоду наблюдаемых колебаний и по оценке массы вещества, вовлеченного во вращение, было получено, что солнечное пятно — относительно «мелкое» образование, глубина его нижней границы не превышает нескольких тысяч километров. Иными словами,  $l$  — «нижняя граница пятна», тот уровень, с которого магнитная силовая трубка пятна начинает резко расходиться книзу, — располагается на глубине всего нескольких тысяч километров. В те годы этот результат был достаточно неожиданным и вызывал недоверие. Однако впоследствии он был независимо подтвержден и

другими авторами [29, 43], исследовавшими крутильные колебания пятен, а в последние годы концепция «мелкого» пятна нашла непосредственное подтверждение и в данных современной гелиосейсмологии [44], показавших, что сильно сжатая часть магнитной силовой трубки пятна действительно прослеживается до глубин всего в 4–5 тыс. км. В более глубоких слоях магнитное поле пятна резко ослаблено — оно «размывается» конвективными движениями (восходящим горячим потоком). Таким образом, результаты расчетов по теоретической модели, предложенной более 20 лет назад, нашли непосредственное подтверждение в данных современной гелиосейсмологии пятен.

В диссертации 1992 г. [45, табл. 2] нами были приведены периоды собственных колебаний пятен в зависимости от напряженности магнитного поля, находящиеся как раз в диапазоне наблюдаемых в настоящее время величин ( $T \sim$  от 20 до 300 мин).

Таким образом, мы можем сделать уверенный вывод о том, что модель «мелкого» солнечного пятна хорошо «работает», правильно отражает специфику изучаемого объекта.

Эта модель схематически изображена на рис 1.

Упрощая геометрию магнитного поля правильного круглого пятна, примем, что на глубинах  $\zeta < h < l$  поле имеет однородное цилиндрическое распределение. Среднее по сечению радиуса  $a$  значение напряженности магнитного поля обозначим  $B$ , а характерное значение внешнего поля в окружающей пятно фотосфере —  $B_0$  ( $\approx 200$ – $300$  Гс). Глубина нижней магнитной границы пятна  $l$  — это глубина слоя, начиная с которого магнитная силовая трубка пятна начинает резко расширяться книзу. Течениями Эвершеда в полутени пятна будем пренебрегать.

В данной модели учтены все основные структурные и физические особенности солнечного пятна: напряженность магнитного поля в центре пятна и напряженность внешнего магнитного поля  $B_0$ , размер пятна (радиус тени  $a$  или магнитный поток  $B\pi a^2$ ), шкала магнитной высоты  $\lambda_m$ , описывающая веерообразную структуру магнитного поля над пятном, глубина вильсоновской депрессии  $\zeta$  и глубина нижней магнитной границы  $l$ . Для учета зависимости эффективной температуры пятна от напряженности магнитного поля  $T_{S,ef}(B)$  в модели использовано эмпирическое соотношение, полученное в работе [45]. На глубинах  $\zeta < h < l$  баланс давлений по сечению имеет простой вид:

*Рис. 1.* Изображение солнечного пятна и нижележащих слоев по данным гелиосейсмологии [44] (слева). Схематический вертикальный разрез солнечного пятна (справа)

$$P_{ex} = P_{in} + \frac{B^2}{8\pi}. \quad (1)$$

Мы не станем здесь детально описывать, как строится данная модель солнечного пятна, укажем лишь, что в основе подхода лежит вариационный энергетический принцип: записывается функционал энергии системы; его первая вариация, вычисленная при условии неизменности массы и магнитного потока, дает работу суммы сил, действующих на систему, а вторая вариация — работу возмущающих сил или потенциальную энергию. Детальное описание модели можно найти в работе [45].

Существенной особенностью модели является учет перераспределения газовых масс по вертикали в неоднородной магнитной трубке. Солнечное пятно формируется из всплывшей квазивертикальной магнитной силовой трубки. Фотосферная ее часть охлаждается вследствие лучистого высвечивания, поскольку торможение конвекции нарастающим магнитным полем не позволяет поддерживать баланс тепла в наблюдаемых слоях на том же уровне температур, что и в окружающей фотосфере. По мере охлаждения поверхностных слоев пятна понижается шкала высоты в этих слоях и часть массы газа из верхней магнитной «воронки» перемещается (по мере формирования пятна) вниз, на глубину нижней границы пятна, —

так образуется вильсоновская депрессия и понижается гравитационная энергия системы. Эффект перераспределения массы по вертикали при квазистатическом локальном сжатии вертикальной силовой трубки легко показать. Дифференцируя (1) по  $z$  и учитывая, что при гидростатическом равновесии  $\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$ ,  $\frac{\partial P_{ex}}{\partial z} = -\rho_{ex} g$ , получим

$$8\pi g(\rho - \rho_{ex}) = \frac{\partial B^2}{\partial z}, \quad (2)$$

т. е. в части магнитной силовой трубки, расширяющейся кверху, возникает дефицит плотности, а в части трубки, расширенной книзу, — избыток.

Таким образом, три основных структурных особенности солнечного пятна:

- охлаждение, приводящее к его боковому поджатию;
  - веерообразная структура магнитного поля над пятном, обуславливающая образование полутени солнечного пятна;
  - пониженный по сравнению с фотосферой геометрический уровень наблюдаемых слоев пятна, где  $\tau = 1$ , —
- тесно связаны между собой в едином физическом процессе охлаждения и перераспределения газовых масс по вертикали пятна. Масса газа из «воронки пятна», т. е. из области вильсоновской депрессии, перетекая на глубину  $l$ , обеспечивает устойчивое состояние всей системы. При боковом сжатии и погружении пятна в более плотные слои фотосферы и конвективной зоны, с одной стороны, возрастает магнитная энергия системы, препятствующая дальнейшему росту поля, а с другой — уменьшается (за счет вертикального перераспределения плотности) гравитационная энергия системы, что способствует его дальнейшему погружению. Баланс этих двух тенденций и определяет равновесные состояния пятна, а также их устойчивость относительно вертикальных смещений пятна как целого. Очевидно, что эти смещения сопровождаются изменением напряженности магнитного поля в пятне: когда пятно «приподнимается», его поле ослабевает, когда погружается — растет.

### **Зависимость частоты собственных колебаний пятен от напряженности магнитного поля**

Вычисление второй вариации энергии позволяет определить потенциальную энергию возмущения и, следовательно, найти частоту

колебаний системы как целого в зависимости от напряженности магнитного поля в пятне  $\omega(B)$ . В выражение для частоты входят два параметра системы: радиус пятна (или магнитный поток в пятне  $\Phi = \pi a^2 B$ ), а также численный коэффициент  $\epsilon$ , определяющий величину магнитной шкалы высоты в наблюдаемых слоях пятна. Мы выбираем его таким, чтобы  $\lambda = 1$  тыс. км. Зависимость  $\omega(B)$  для двух различных значений магнитного потока  $\Phi$  ( $\Phi_1 = 130 \times 10^{19}$  Гс  $\cdot$  см<sup>2</sup>,  $\Phi_1 = 500 \times 10^{19}$  Гс  $\cdot$  см<sup>2</sup>), соответствующих средним ( $a \approx 4$  тыс. км) и крупным ( $a \approx 8$  тыс. км) пятнам, представленным на рис. 2.

Мы видим, что область устойчивости пятен по  $H$  занимает интервал от 1 до 4–5 кГс в полном соответствии с реальностью. Для пятен среднего размера наблюдаемые значения частот собственных колебаний покрывают всю теоретическую кривую  $\omega(B)$ , прорисовывая как ветвь роста частоты с увеличением  $H$ , так и ветвь спада.

## Заключение

В настоящее время имеются достаточно надежные и многочисленные данные о долгопериодических собственных колебаниях солнечного пятна как целого (и для оптического, и для радиодиапазона) с периодами от десятков минут до нескольких суток. Поэтому на сегодня мы можем с уверенностью сказать, что новое направление сейсмологии солнечных пятен на базе долгопериодических колебаний имеет достаточно оснований для своего успешного развития: имеется разнообразная и надежная наблюдательная основа и проверенная временем теоретическая модель явления, доказавшая свою прогностическую силу.

Предлагаемое для разработки направление солнечных исследований является принципиально новым: до сих пор никто не занимался достаточно глубоко и целенаправленно изучением долгопериодических колебаний пятен, несмотря на то, что содержащаяся в них информация совершенно необходима для понимания физической природы солнечных пятен.

В астрофизической литературе по указанной проблеме встречаются лишь отдельные упоминания, наиболее важные работы из уже сделанных в этом направлении принадлежат пулковским астрономам.

Вместе с тем важно подчеркнуть, что эффективное развитие предложенного направления, обеспечивая существенный прогресс в понимании физической природы солнечных пятен, не предполагает боль-

*Рис. 2.* Зависимость частоты собственных колебаний больших (магнитный поток 500 единиц  $10^{19}$  Гс · см<sup>2</sup>) и средних (поток 130 единиц) пятен от напряженности магнитного поля. Частоте 0.0052 соответствует период колебаний 200 мин, частоте 0.0026 — 40 мин. Ромбиками отмечены наблюдения Ю. А. Наговицына и Г. Ф. Вяльшина (22 точки, период найден по вариациям магнитного поля пятна, измеренным по зеемановскому расширению линий), квадратиками — наблюдения Л. Д. Парфиненко по лучевым скоростям (7 точек) и по изменению магнитного поля (3 точки)

ших материальных затрат: не требуется создания новых приборов и инструментов, запуска космических аппаратов и пр. Достаточно обрабатывать уже имеющиеся наблюдательные данные по апробированным авторским методикам, продолжать наблюдения на действующих инструментах и развивать теоретическую модель явления.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 30 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце—Земля».

## Список литературы

1. *Christensen-Dalsgaard J.* Helioseismology // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74, № 4. P. 1073–1129.
2. *Thompson M. J.* Helioseismology and the Sun's interior // *Astronomy and Geophysics*. 2004. Vol. 45. № 4. P. 21–25.
3. *Aschwanden M. J. et al.* Coronal loop oscillations Observed with the TRACE // *Ap. J.* 1999. Vol. 520. № 2. P. 880–894.
4. *Nakariakov V. M., Verwichte E.* Seismology of the corona of the Sun // *Astronomy and Geophysics*. 2004. Vol. 45. № 4. P. 25–27.
5. *Соловьев А. А., Михальев Б. Б., Киричек Е. А.* Радиационное затухание колебаний корональных петель // *Физика плазмы*. 2002. Т. 28, № 8. С. 758–764.
6. *Соловьев А. А., Михальев Б. Б., Киричек Е. А.* Корональные осцилляции: внутренняя структура петли // *Там же*. 2003. Т. 29, № 12. С. 1130–1136.
7. *Михальев Б. Б., Соловьев А. А.* МГД-волны в корональных петлях с оболочкой // *Письма в Астроном. журн.* 2004. Т. 30, № 4. С. 307–314.
8. *Mikhalyev B. B., Solov'ev A. A.* The oscillations of coronal loops including the shell // *Solar Physics*. 2005. Vol. 227. № 2. P. 249–263.
9. *Thomas J. H., Cram L. E., Ney A. H.* Five-minute oscillations as a subsurface probe of sunspot structure // *Nature*. 1982. Vol. 297. P. 485–487.
10. *Thomas J. H.* Oscillations in sunspots // *Australian J. of Phys.* 1989. Vol. 38. P. 811–824.
11. *Thomas J. H.* Sunspots seismology // *News Letter of the Astron. Soc. of New York*. 1992. Vol. 4, № 2. P. 4.
12. *Bogdan T. J., Braun D. C., Lites B. W. et al.* The seismology of sunspots: a comparison of time-distance and frequency-wavenumber methods // *Ap. J.* 1998. Vol. 492. P. 379–389.
13. *Zhugzda Y. D., Locans V., Staude J.* // *Solar Phys.* 1983. Vol. 82. P. 369; *Astron Nachr.* Vol. 308. P. 257.
14. *Мозилевский Э. И., Обриджо В. Н., Шельтинг Б. Д.* // *Астроном. циркуляр*. 1972. № 669. С. 1.
15. *Bogdan T. J.* Sunspot oscillations: a review // *Solar Phys.* 2000. Vol. 192. P. 373–394.

16. Solar Phys. Vol. 192. № 1–2. 2000 — Topical Issue: SOHO-9 Workshop «Helioseismic Diagnostics of Solar Convection and Activities» 12–15 July 1999. Stanford Univ. California. U. S. A.
17. *Zhukov V. I.* Oscillations on the Sun in regions with a vertical magnetic field // A&A. 2005. Vol. 433. P. 1127–1132.
18. *Соловьев А. А.* Энергетика солнечного пятна // Солнечные данные. 1976. № 4. С. 54–60.
19. *Соловьев А. А.* Элементарная энергетическая модель солнечного пятна // Астроном. журн. 1984. Т. 64, вып. 5. С. 764–770.
20. *Соловьев А. А.* Крутильные колебания солнечных пятен // Солнечные данные. 1984. № 1. С. 73–78.
21. *Наговицын Ю. А., Наговицына Е. Ю.* Исследование свойств долгопериодических колебаний в избранных группах солнечных пятен с помощью прецизионной методики. // Там же. 1989. № 6. С. 93.
22. *Ихсанов Р. Н., Наговицына Е. Ю.* О линейной и квазиколебательной компонентах собственных движений солнечных пятен по наблюдениям 13 января 1984 г. // Там же. 1990. № 4. С. 77–83.
23. *Borzov V. V., Vialshin G. F., Nagovitsyn Yu. A.* Variations of the Field Strengths in the Sunspots of 1982 June and July Groups and 1984 June Group // Contrib. Astr. Obs. Skalnaté Pleso. 1986. Vol. 15. P. 75–85.
24. *Наговицына Е. Ю.* Исследование квазипериодических движений пятен и особенностей горизонтального поля скорости на Солнце координатными методами повышенной точности: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Л.: ГАО РАН, 1990.
25. *Вяльшин Г. Ф., Наговицын Ю. А.* Особенности колебательных процессов в группах солнечных пятен СД 135/1984 и 136/1984 // Солнечные данные. 1990. N 9. С. 91–96.
26. *Наговицын Ю. А., Наговицына Е. Ю.* Абсолютные горизонтальные колебания солнечных пятен и глобальная организация их периодов // Там же. 1991. № 2. С. 83–88.
27. *Nagovitsyn Yu. A., Vyalshin G. F.* Quasi-periodic Variations of Magnetic Field Strength in Sunspots // Астроном. циркуляр. 1992. № 1553.

28. *Наговицын Ю. А., Наговицына Е. Ю.* Методические аспекты измерения горизонтального поля скорости на Солнце координатными методами повышенной точности // Кинематика и физика небесных тел. 1996. Т. 12, № 6. С. 55.
29. *Наговицын Ю. А.* Крутильные колебания и эффективная глубина солнечных пятен // ПАЖ. 1997. Т. 23, № 11, С. 749–751.
30. *Gelfreikh G. B., Shibasaki K., Nagovitsyna E. Yu. et al.* Analysis of quasi-periodic oscillations of position and brightness of details of the radio sources of the solar active regions based on observations made with the radio heliograph Nobeyama // Proc. of IAU Symp. No 223. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. St. Petersburg, 2004. P. 245–246.
31. *Gelfreikh G. B., Nagovitsyn Yu. A., Nagovitsyna E. Yu.* Quasi-periodic oscillations of Microwave Emission in Solar Active Regions // Publ. Astr. Soc. Japan. 2006. Vol. 58, № 1.
32. *Гопасюк С. И.* Крутильные колебания и диагностика структуры подфотосферного магнитного поля // Астроном. журн. 1984. Т. 616 вып. 1ю С. 157–162.
33. *Гопасюк С. И.* О возможном присутствии в пятнах крутильных колебаний с периодом около 40 минут // Изв. КрАО. 1985. Т. 73. С. 9–15.
34. *Гопасюк С. И., Лямова Г. В.* Крутильные колебания пятен // Там же. 1987. Т. 77. С. 17–24.
35. *Наговицына Е. Ю., Наговицын Ю. А.* Наблюдения когерентных структур магнитного поля в области солнечных пятен // Письма в Астроном. журн. 1998. Т. 24, № 7.
36. *Parfinenko L. D.* Research on sunspot oscillations // Solar Phys. 2003. Vol. 213. P. 291–299.
37. *Ефремов В. И., Иханов Р. Н., Парфиненко Л. Д.* Колебаний лучевых скоростей и магнитного поля в тени солнечных пятен // Тр. VII Пулков. междунаро. конф. по физике Солнца, ГАО РАН, Пулково, 7–11 июля, 2003 г. СПб., 2003. С. 165–170.
38. *Ефремов В. И., Парфиненко Л. Д.* О короткопериодических колебаниях магнитного поля в тени солнечного пятна // Астроном. журн. 1996. Т. 73. С. 103–108.
39. *Гельфрейх Г. Б. и др.* Квазипериодические колебательные процессы над солнечными пятнами по данным радиогелиографа Но-

- беяма // Тр. VII Пулков. конф. по физике Солнца. Климатические и экологические аспекты солнечной активности, ГАО РАН, 7–11 июля 2003 г. СПб., 2003. С. 111–116.
40. *Наговицын Ю. А., Наговицына Е. Ю.* Простые униполярные группы пятен и горизонтальное поле скоростей на Солнце // Тр. III Пулков. конф. по физике Солнца. Крупномасштабная структура солнечной активности, ГАО РАН, 21–25 июня 1999 г. СПб., 1999. С. 181–186.
41. *Кадомцев Б. Б.* Гидромагнитная устойчивость плазмы // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат. 1963. Вып. 2. С. 132–177.
42. *Шафранов В. Д.* Равновесие плазмы в магнитном поле // Там же. С. 92–131.
43. *Певцов А. А., Самтаров И. С.* Исследование крутильных колебаний солнечных пятен // Солнечные данные. 1985. № 3. С. 65–71.
44. *Zhao J., Kosovichev A. G., Duval T. L.* Investigation of mass flows beneath a sunspot by time-distance helioseismology // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 557. P. 384–388.
45. *Kopp G., Rabin D.* // *Solar Phys.* 1992. Vol. 141. P. 253–265.
46. *Соловьев А. А.* Модель солнечного пятна с гравитационной энергией связи // Тр. IX Пулков. конф. по физике Солнца, ГАО РАН, Пулково, 4–9 июля 2005 г. СПб., 2005. С. 577–588.

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

### Введение

Атмосферная оптика как самостоятельная область науки возникла достаточно давно. В ее основе стояли два вопроса, которые всякий раз возникают при наблюдении какого-либо эффекта или явления, если природа его неизвестна. Первый вопрос можно сформулировать просто: «Что мы видим?», то есть, какова природа явления. Второй вопрос, возникающий чуть позже: «Что нового об окружающем нас мире мы можем узнать, наблюдая это явление?», или какие именно наблюдения мы должны проводить для того, чтобы после раскрытия природы явления максимально расширить информацию об его источниках и до каких пределов это удастся сделать.

Основным наблюдаемым явлением, поставившим эти вопросы перед учеными, был яркий фон дневного и сумеречного неба. С улучшением условий наблюдения и прозрачности атмосферы сюда же был включен и фон ночного неба. Вопрос о природе фона неба интересовал арабских ученых еще на рубеже первого и второго тысячелетия, однако он не был разрешен в течение многих веков. Ответ на него был получен лишь в XIX в., с открытием явления рассеяния света. Многообразие оптических явлений, наблюдаемых на небе, особенно во время сумерек, указывало на сложность строения атмосферы и широкие возможности по ее исследованию на различных высотах. Исследования ночного неба еще более расширяли круг затрагиваемых вопросов, теперь уже для верхних слоев атмосферы.

В XX в. круг проблем, в решении которых важная (или даже определяющая) роль была отведена атмосферной оптике, охватывал вопросы атмосферного аэрозоля, малых газовых примесей, в том числе озона, температурного распределения и состава верхней атмосферы, механизмов образования эмиссии ночного неба, слоев натрия и калия, серебристых облаков. Для решения указанных задач необходимо использовать спектральные и поляризационные данные, существенно увеличивающие объем информации. Поляризационные

измерения особенно эффективны для исследований рассеяния света в атмосфере и самих рассеивающих компонент, в том числе аэрозоля. Этому вопросу посвящена большая часть настоящей лекции.

## Разделы атмосферной оптики

Само понятие «атмосферная оптика» указывает на то, что данная наука предполагает теоретический или экспериментальный анализ излучения, приходящего от атмосферы Земли. В данном обзоре мы ограничимся видимой областью и прилежащим к ней диапазонам электромагнитного спектра. Будучи достаточно холодной, атмосфера практически не излучает в этой области самостоятельно. Исключения составляют лишь эмиссии ночного неба, изучение которых можно выделить в первый раздел атмосферной оптики.

Сильнее всего собственное излучение атмосферы Земли проявляется в виде полярных сияний. Спектр полярных сияний состоит из ряда линий, главными из которых являются линия нейтрального атомарного кислорода  $5577 \text{ \AA}$  и триплет этого же элемента  $6300$ ,  $6363$  и  $6392 \text{ \AA}$ , преобладание которых придает полярному сиянию соответственно зеленый или красный цвет (третья линия в триплете достаточно слабая, и он фактически наблюдается как дублет). Все эти линии запрещенные и могут образовываться только в разреженной среде, что имеет место в верхней атмосфере. Источником возбуждения линий полярного сияния являются энергичные частицы солнечного ветра, влетающие в магнитосферу Земли и достигающие атмосферы вблизи магнитных полюсов нашей планеты. Исследования полярных сияний позволяют изучить физические условия в верхней атмосфере Земли и в ее магнитосфере. В настоящее время проводятся измерения эмиссии ночного неба не только в естественных полярных сияниях, но и создаются «искусственные» сияния путем нагрева электронного газа верхней атмосферы мощным высокочастотным излучением с Земли [1].

Существует и другой механизм возбуждения эмиссионных линий ночного неба. Этот механизм во многом противоположен полярным сияниям: он работает в основном в тропическом поясе Земли (поэтому данное излучение иногда называют «тропическими полярными сияниями»), а энергия поступает от источников в нижних слоях атмосферы — мощных тропических циклонов. Акустико-гравитационные волны распространяются в верхние разреженные слои атмосферы, где их амплитуда существенно увеличивается. В это

время наблюдается повышенная интенсивность эмиссий ночного неба в линии кислорода  $5577 \text{ \AA}$ , желтом дублете натрия ( $5890$  и  $5896 \text{ \AA}$ ), а также в полосах гидроксила ОН в ближней инфракрасной области спектра. Фон неба в этих линиях часто имеет четкую волнообразную структуру [2]. Высоты слоев ОН, Na и O оказались равными  $85$ ,  $90$  и  $95$  км, что близко к высоте последнего температурного минимума в атмосфере. Измерения параметров волн дают возможность локализовать их источник в тропосфере, исследовать механизм их переноса. Более того, акустико-гравитационные волны и наблюдаемая волновая структура эмиссии ночного неба могут служить предвестниками атмосферных тайфунов и, возможно, землетрясений, что существенно увеличивает интерес к данному разделу атмосферной оптики.

Запрещенные линии атомарного кислорода являются наиболее удобными для наблюдений, так как они достаточно ярки и легко выделяются в спектре фона неба как во время полярных сияний или повышенной волновой активности, так и в «спокойном» состоянии фона. Другие составляющие фона ночного неба этих линий не содержат. Проведение наблюдений в линиях натрия могут быть затруднены наличием этих же линий в спектре засветки неба от крупных городов, а также (уже как линии поглощения) в спектре Солнца и, следовательно, компонент фона ночного неба, связанных с рассеянием солнечного излучения. Наблюдения в линиях гидроксила обычно проводят в широких спектральных полосах в ближней инфракрасной области, при этом необходимо учитывать излучение фона неба в континууме.

Все остальные темы атмосферной оптики предполагают анализ излучения, рассеянного или поглощенного в атмосфере, для чего необходим внешний источник света. Отнесем ко второму разделу атмосферной оптики вопросы и методы, при которых используется искусственный источник излучения. Здесь особое внимание нужно уделить лидарному зондированию атмосферы (LIDAR — Light Detection And Ranging). В ходе лидарного эксперимента лазерный луч направляется в атмосферу вертикально или под некоторым углом, а приемник регистрирует возвращающееся обратно рассеянное излучение. Так как время прихода рассеянного излучения зависит от его высоты, с помощью лидара можно восстанавливать высотное распределение коэффициента обратного рассеяния и температурное распределение в атмосфере. Выбирая нужным образом длину волны, на которой работает лидар, можно исследовать аэрозольное рассеяние в континууме или резонансное рассеяние отдельных атмосфер-

ных компонент (например, атомарного натрия и калия). В настоящее время лидарное зондирование является основным методом исследования мезосферы.

Точность лидарных измерений концентрации аэрозоля можно значительно улучшить, используя так называемый кросс-поляризационный лидар, и это первый, но далеко не единственный пример эффективности поляризационных измерений в атмосферной оптике. Суть кросс-поляризационной методики состоит в том, что молекулярное (релеевское) рассеяние обладает хорошо известными поляризационными свойствами. В частности, фон обратного рассеяния линейно поляризованного излучения будет также линейно поляризован, причем в той же плоскости. Если луч лазера будет линейно поляризованным, а рассеянный сигнал принимается в плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости поляризации лазерного излучения, то вклад молекулярного рассеяния в этот сигнал уменьшится практически до нуля, выделяя менее поляризованное аэрозольное рассеяние. Измерения высотного аэрозольного распределения обычно показывают существенное увеличение коэффициента рассеяния (по отношению к молекулярному рассеянию) в тропосфере и мезосфере — области температурного минимума и серебристых облаков.

Одной из главных проблем лидарного метода зондирования атмосферы, как и всех других методов, связанных с измерением рассеянного излучения, является необходимость учета многократного рассеяния света в атмосфере. Эта проблема встает наиболее остро для кросс-поляризационного лидара, так как многократно рассеянное излучение поляризовано слабее, чем однократно рассеянное, и кросс-поляризационный фильтр будет задерживать его в существенно меньшей степени, чем фон однократного молекулярного рассеяния.

Третий раздел атмосферной оптики связан с анализом поглощения и рассеяния в атмосфере излучения внешних естественных источников, прежде всего Солнца (хотя в этой роли могут выступать Луна и даже яркие звезды и планеты). Рассеяние солнечного излучения в атмосфере формирует фон дневного и сумеречного неба, характеристики которого существенно зависят от состояния атмосферы — концентрации, высотного распределения и рассеивающих свойств аэрозоля, содержания малых атмосферных примесей, имеющих полосы поглощения в видимой области спектра (прежде всего озона и водяного пара). Фон ночного неба также во многом определяется рассеянием солнечного света, только уже не в атмосфере, а

в межпланетном пространстве, эта компонента ночного неба известна как зодиакальный свет. Однако рассмотрение этого явления уже выходит за пределы атмосферной оптики, и мы обратим особое внимание на процессы рассеяния солнечного света именно в атмосфере, происходящие днем и во время сумерек.

### **Анализ дневного и сумеречного неба**

Дневное и сумеречное небо при всей своей визуальной схожести имеет существенно разную геометрию образования и, вообще говоря, определяется разными атмосферными факторами. Для того чтобы разобраться в этом вопросе, опишем основные рассеивающие компоненты атмосферы и их свойства. Мы уже немного касались их при описании лидарного метода исследования атмосферы.

Первая и главная рассеивающая компонента — газовая составляющая, формирующая молекулярное рассеяние. Свойства этого процесса хорошо известны. Коэффициент молекулярного рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны, и коротковолновое излучение рассеивается в атмосфере значительно сильнее, что и объясняет голубой цвет ясного дневного неба (в сумерки цвет неба ведет себя достаточно сложным образом и определяется сразу несколькими факторами, но об этом чуть позже). Фон молекулярного рассеяния достаточно сильно поляризован, о чем уже говорилось выше. Но, в отличие от источника в кросс-поляризационном лидаре, солнечное излучение неполяризовано. В этом случае излучение, рассеянное вперед и назад, будет также неполяризовано, а вот при рассеянии под прямым углом степень поляризации достигает почти единицы, точнее 94 % для земного воздуха. Плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния, то есть плоскости, в которой лежат прямой и рассеянный луч. При этом коэффициент рассеяния атмосферы под углом в  $90^\circ$  примерно вдвое меньше, чем коэффициент рассеяния вперед или назад. Таким образом, если рассматривать рассеяние солнечного излучения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях поляризации (перпендикулярной и параллельной плоскости рассеяния) как независимые процессы, то первый из них будет изотропным, а второй будет происходить преимущественно вперед и назад.

Однако рассеяние солнечного излучения происходит также на аэрозольных частицах, чей размер сравним или превышает длину волны видимого излучения. Здесь характер рассеяния будет существенно отличаться. Появится анизотропия рассеяния: большая часть излучения будет рассеиваться под малыми углами, в направлении, близком к направлению падающего излучения. Аэрозольное рассеяние отличается от молекулярного и своими спектральными характеристиками — коэффициент рассеяния хоть и будет возрастать в коротковолновой области, но значительно медленнее, чем для молекулярного рассеяния. Именно поэтому при сильной запыленности атмосферы вокруг Солнца появляется яркий ореол, а цвет неба вместо голубого становится белесым.

Поляризационные свойства аэрозольного рассеяния отличаются от молекулярного рассеяния значительно меньшей поляризацией при рассеянии под углом  $90^\circ$ . Лабораторные измерения различных образцов вулканической пыли [3] показали, что в видимой области спектра поляризация составляет 15–20 %. Естественно, что в запыленной атмосфере поляризация фона неба будет существенно ослабляться. Поляризационные измерения фона на разных угловых расстояниях от Солнца (то есть для разных углов рассеяния) могут дать информацию о свойствах рассеивающего вещества, содержании и типе атмосферного аэрозоля.

Однако при подобном анализе мы столкнемся с проблемой, о которой уже говорилось при описании лидарного метода. Атмосфера Земли имеет значительную оптическую толщину, и фон неба представлен не только однократным, но и многократным рассеянием света. Особенно серьезной эта проблема будет при анализе неба в период сумерек, когда солнечные лучи проходят большой путь сквозь атмосферу над поверхностью Земли. Поляризация многократного рассеянного излучения будет определяться распределением яркости по всему небесному своду и будет также существенно меньше, чем в случае однократного молекулярного рассеяния. Спектральный состав многократного рассеяния заранее неизвестен. С одной стороны, большее количество актов рассеяния должно приводить к избытку в коротковолновой области, но с другой стороны, там увеличивается и поглощение излучения, проходящего между актами рассеяния длинный путь в атмосфере.

Днем, при большой высоте Солнца над горизонтом, относительный вклад многократного рассеяния не очень велик, но поляризация фона неба даже в  $90^\circ$  от Солнца неполная. Это связано с тем,

что фон неба образуется в основном рассеянием солнечных лучей в нижних плотных слоях атмосферы, которые содержат много аэрозоля. Анализ распределения яркости и поляризации фона дневного неба могут дать достаточно качественную информацию об оптических свойствах атмосферы, но только лишь в ее приземных слоях [4].

По мере того как Солнце опускается к горизонту, оптическая толщина атмосферы на пути его лучей увеличивается и приземные слои атмосферы освещаются слабее. В некоторый момент времени рассеяние прямого солнечного излучения в приземном слое уже перестает быть определяющим для формирования фона неба. Более высокие слои тропосферы, несмотря на свою меньшую плотность, рассеивают больше солнечного света из-за меньшего поглощения солнечных лучей в этих слоях. В отличие от астрономического понятия сумерек, начинающихся с заходом Солнца, исследователи атмосферы считают окончанием дня и началом сумерек именно момент отрыва слоя эффективного рассеяния света (его еще называют «сумеречным слоем») от поверхности Земли. Этот момент зависит от длины волны и положения точки наблюдения на небе. В зените для желто-зеленой области спектра это происходит при высоте Солнца над горизонтом около  $5-6^\circ$ . После этого фон неба эволюционирует по «сумеречным» законам, быстро уменьшая свою яркость. В коротковолновой области спектра, где поглощение света сильнее, сумерки начинаются еще раньше и яркость неба убывает быстрее. Это приводит к изменению цвета неба, которое к заходу Солнца превращается из насыщенно голубого в бледно-голубое. В отсутствие атмосферного озона, имеющего полосы поглощения в желто-зеленой области спектра, сумеречное вообще теряло бы голубой оттенок. Покраснение неба продолжается и после захода Солнца вплоть до его погружения под горизонт на  $4-5^\circ$  (зенитного расстояния  $94-95^\circ$ ).

С заходом Солнца сумеречный слой поднимается все выше над наблюдателем, и, измеряя характеристики фона неба в разные периоды сумерек, мы фактически исследуем разные слои атмосферы. Именно этим сумеречное небо отличается от дневного. Возможность исследования атмосферы на разных высотах привлекала внимание большого количества ученых к сумеречному методу.

В то же время вклад многократного рассеяния в фон неба во время сумерек, значительно больший, чем днем, оставался основной проблемой этого метода, существенно ограничивая его точность и высотный диапазон применимости. Самые разнообразные методы

оценки вклада многократного рассеяния, делавшиеся в XX в., становились поводом весьма жесткой полемики [5]. Сделать существенный шаг вперед в этом вопросе удалось только в последние десятилетия, с появлением мощной вычислительной техники.

Разделить фон сумеречного неба на его отдельные составляющие, выделить многократное рассеяние и рассеяние на аэрозольных частицах помогают данные о поляризации сумеречного неба, так как эта характеристика весьма чувствительна к изменениям вклада различных компонент в фон неба. На рисунке показаны зависимости степени поляризации фона сумеречного неба от зенитного расстояния Солнца для четырех длин волн. Первое, что обращает на себя внимание, — уменьшение поляризации в коротковолновой области спектра. Как было показано, оно связано с увеличением вклада многократного рассеяния, превышающего в фиолетовой области спектра 50 % даже в светлые сумерки [6]. С увеличением вклада многократного рассеяния связано и уменьшение поляризации неба в темные сумерки, при зенитных расстояниях Солнца более  $95^\circ$ . Преобладание коротковолнового излучения в многократно рассеянном фоне приводит к тому, что постепенное покраснение сумеречного неба в это время сменяется достаточно быстрым посинением, и в темные сумерки цвет ясного неба оказывается еще более синим, чем днем.

Все описанные эффекты никак не связаны с атмосферным аэрозолем, хотя подобные предположения часто делались многими исследователями атмосферы в XX в., что иногда приводило их к совершенно необычным свойствам гипотетических аэрозольных частиц. Данная компонента фона атмосферы, самая важная и интересная для исследований, проявляет себя лишь уменьшением поляризации в светлые сумерки, заметным только для длинноволнового излучения ( $7600 \text{ \AA}$  на рисунке) и изредка, при не очень хорошей прозрачности атмосферы, в желто-зеленой области спектра. В красных лучах поглощение света минимальное и сумеречный слой располагается достаточно низко. Мы регистрируем аэрозольное рассеяние только на небольших высотах в тропосфере. Его следы исчезают при погружении Солнца под горизонт на  $3^\circ$  на длине волны  $7600 \text{ \AA}$ , то есть при эффективной высоте сумеречного слоя около 15 км и высоте его нижней границы примерно 10 км. Этот же результат получается из совершенно иных по своему характеру исследований [7, 8].

Содержание аэрозоля в атмосфере, как и порождаемое им понижение поляризации в красной области спектра в светлые сумерки, в отличие от других эффектов подвержены сильным вариациям, су-

*Рис. 1.* Зависимость поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния Солнца

щественно изменяясь от сумерек к сумеркам. В отдельные дни с хорошей прозрачностью атмосферы вклад аэрозольного рассеяния в яркость сумеречного неба в зените в момент восхода Солнца не превышал 10 % на длине волны 7600 Å, в другие же дни при, казалось, ясном небе он достигал 40–50 %. Наблюдательные данные позволили оценить и поляризацию аэрозольного рассеяния под прямым углом (именно такая ситуация реализуется в зените в светлые сумерки), которая составила примерно 20 %, в согласии с [3].

Таким образом, поляризационные измерения сумеречного неба позволяют определить параметры аэрозольного рассеяния, вклад многократного рассеяния, причем результаты оказываются в хорошем согласии с данными численного моделирования [9]. Полученные соотношения, кроме всего прочего, объясняют цветовые явления, происходящие во время сумерек, в том числе «пояс Венеры» — разноцветные горизонтальные полосы, появляющиеся с противоположной Солнцу стороны неба.

Однако этим возможности сумеречного метода исследования атмосферы (и вообще анализа взаимодействия атмосферы с излучением Солнца) не исчерпываются. В последние десятилетия XX в.

начались активные спектральные исследования сумеречного неба с целью измерения содержания в атмосфере малых газовых примесей. Слабые спектральные линии поглощения этих газов практически незаметны в спектре прямого солнечного излучения, проходящего через атмосферу в вертикальном направлении. А во время сумерек, когда излучение Солнца проходит длинный путь через плотные слои атмосферы, поглощение в спектральных линиях может стать ощутимым. Широкие полосы поглощения озона в желто-зеленой области спектра (полосы Шапюи), ослабляющие вертикальное излучение всего на 4–5 %, во время сумерек становятся настолько заметными, что существенно изменяют цвет неба, возвращая ему уже было потерянный из-за описанных выше причин голубой оттенок.

В настоящее время разработана методика DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) [10], с помощью которой в спектре фона неба выделяются полосы поглощения озона, окисей азота, хлора, брома и многих других атмосферных примесей. Данные исследования являются важной составляющей экологического контроля атмосферы Земли. К этому необходимо добавить, что высота над земной поверхностью, на которой проходят лучи Солнца, создающие сумеречный фон неба, зависит от длины волны и периода сумерек. Тем самым подобные измерения позволяют судить не только о полном содержании той или иной примеси в атмосфере, но и об ее высотном распределении.

Еще более высокой точности и вертикального разрешения можно достичь, наблюдая спектр Солнца или другого источника вблизи края Земли со спутника на околоземной орбите. Кроме этих преимуществ космический эксперимент позволит охватить большую площадь атмосферы над поверхностью Земли, так как спутник обращается вокруг нашей планеты по орбите, положение которой относительно поверхности Земли изменяется за счет осевого вращения планеты. В настоящее время подобные измерения проводятся в рамках немецко-голландско-бельгийского проекта SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY)[11]. Измерить поглощение касательных лучей Солнца на различных высотах в атмосфере можно и другими, в том числе и наземными способами [8].

## Заключение

Атмосфера Земли — очень сложная система, еще во многом не изученная. В настоящее время с усилением антропогенного воздействия на нашу газовую оболочку и последовавшими за этим климатическими изменениями исследования всех слоев атмосферы стали особенно важными. И одна из ведущих ролей в этом отведена оптическим исследованиям, так как взаимодействие атмосферы с излучением весьма разнообразно и количество информации, которое могут дать оптические измерения, очень велико. Являясь фактически единственным средством атмосферных исследований (кроме приземного слоя) до появления ракетной техники, атмосферная оптика и сейчас не потеряла своей актуальности, активно используя современные технические достижения.

## Список литературы

1. *Holma H., Kaila K. U., Kosch M. J. et al.* Recognizing the blue emission in artificial aurora // *Adv. Space Res.* 2005. (In press).
2. *Taylor M. J., Hapgood M. A., Rothwell P.* Observations of Gravity Wave Propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the Near Infrared OH Nightglow Emissions // *Planet. Space Sci.* 1987. Vol. 35. P. 413.
3. *Volten H., Munoz O., Waters R. et al.* Online Database of Scattering Matrices of Irregular Particles // Abstracts of NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry and Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation. Army Research Laboratory. 2003. P. 103. <http://www.astro.uva.nl/scatter>.
4. *Пясковская-Фесенкова Е. В.* Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: АН СССР, 1957.
5. *Розенберг Г. В.* Сумерки. М.: Физ.-мат. лит., 1963.
6. *Угольников О. С., Маслов И. А.* Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // *Физика космоса: Тр. 30-й Международ. студ. науч. конф., 29 янв.— 2 февр. 2001 г.* Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001.

7. Угольников О. С. Определение параметров рассеяния света в земной атмосфере по фотометрическим наблюдениям сумеречного неба // Физика космоса: Программа, тез. докл. и сообщ. 25-й Студ. науч. конф., 29 янв.— 2 февр. 1996 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1996.
8. Угольников О. С., Маслов И. А. Дистанционное зондирование атмосферы на основе фотометрии лунных затмений // Физика космоса: Тр. 35-й Международ. студ. науч. конф., 30 янв.— 3 февр. 2006 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006.
9. Ugolnikov O. S., Postlyakov O. V., Maslov I. A. Effects of Multiple Scattering and Atmospheric Aerosol on the Polarization of the Twilight Sky // J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. Vol. 88. P. 233.
10. Perner D., Platt U. Detection of Nitrous Acid in the Atmosphere by Differential Optical Absorption // J. of Geophysical Research. 1979. Vol. 6. P. 917.
11. Noel S., Burrows J. P., Bovensmann H. et al. Atmospheric trace gas sounding with SCIAMACHY // Advances in Space Research. 2000. Vol. 26. P. 1949.

**К. В. Холшевников**

Санкт-Петербургский государственный университет

## ПРОСТРАНСТВА КЕПЛЕРОВСКИХ ОРБИТ

### Введение

О роли метрики и топологии в задачах небесной механики мы рассказывали на 30-й конференции «Физика космоса». В докладе [1] была введена метрика в пространстве всех эллиптических невозмущенных орбит. Более подробно она описана в статье [2]. Эта метрика существенно использует ограниченность эллипсов и не может быть распространена на гиперболы и параболы. Здесь мы рассмотрим пространство всех возможных невозмущенных орбит и его важнейшее подпространство всех непрямолинейных орбит и определим

два новых вида метрик в них. О возможных приложениях для астрономии и астродинамики говорилось в [1].

## Элементы орбит

Будем рассматривать только невозмущенное движение тела  $Q$  нулевой массы под действием ньютоновского притяжения к телу  $O$  массы  $m_0$ , помещенному в начало координат. Движение описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{\mathbf{r}} + \kappa^2 \frac{\mathbf{r}}{r^3} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{r}$  — вектор  $OQ$ ,  $\kappa^2 = Gm_0$ , где  $G$  — постоянная тяготения. Векторы в  $\mathbb{R}^3$  обозначаем жирными латинскими буквами, их модули — теми же буквами, но набранными обычным шрифтом. Физическая размерность  $G$  —  $\text{м}^3/(\text{с}^2\text{кг})$ ,  $\kappa^2$  —  $\text{м}^3/\text{с}^2$ . Мы указали размерность в системе СИ, хотя в астрономии употребительны и другие системы.

Конфигурационным пространством  $\mathbb{K}_1$  для уравнения (1) служит  $\mathbb{R}^3$  с выколотым началом координат:  $\mathbb{K}_1 = \mathbb{R}^3 \setminus \{O\}$ ; пространство скоростей  $\mathbb{K}_2$  совпадает с  $\mathbb{R}^3$ ; фазовое пространство  $\mathbb{K} = \mathbb{K}_1 \times \mathbb{K}_2$ .

Пространство  $\mathbb{K}_1$  некомпактно. Во-первых, оно неограничено. Это, впрочем, не несет осложнений, так как в силу (1) ускорение  $|\ddot{\mathbf{r}}|$  быстро стремится к нулю с ростом  $r$ . Во-вторых, оно примыкает к особой точке  $O$ , при стремлении к которой ускорение растет до бесконечности. Здесь возникают реальные сингулярности.

Уравнение (1) интегрируется элементарно — см. любой учебник небесной механики, например, [3, 4]. Из вышедших недавно можно отметить [5]. Приведем выражения для интегралов площадей, Лапласа и энергии

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} &= \mathbf{c}, \\ \frac{\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{c}}{\kappa^2} - \frac{\mathbf{r}}{r} &= \mathbf{e}, \\ \frac{\dot{\mathbf{r}}^2}{2} - \frac{\kappa^2}{r} &= h. \end{aligned}$$

В скалярной форме здесь 7 автономных (не зависящих явно от времени) интегралов и соответственно 7 постоянных интегрирования (элементов орбиты), между тем как автономная система (1) шестого

порядка не может иметь их более пяти. Дело в том, что две связи

$$\mathbf{c}\mathbf{e} = 0, \quad 2hc^2 = \varkappa^4(e^2 - 1) \quad (2)$$

оставляют среди 7 указанных интегралов лишь 5 независимых.

Напомним, что вектор площадей  $\mathbf{c}$  направлен по нормали к ориентированной плоскости орбиты, а вектор Лапласа  $\mathbf{e}$ , по модулю равный эксцентриситету, направлен от  $O$  в сторону перигея. Первое из соотношений (2) показывает, что векторы  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{e}$  ортогональны. Из второго, в частности, следует, что при  $e = 1$  или  $h$ , или  $c$  равно нулю.

Слово *орбита* употребляется в астрономии в нескольких смыслах, обычно (но не всегда, что может привести к путанице) ясных из контекста.

Во-первых, это решение уравнения (1), т. е. параметризованная временем кривая, вложенная в конфигурационное или фазовое пространство. Орбита задается шестью элементами. К пяти вышеописанным нужно добавить еще один, кинематический элемент — например эпоху перигея. Набор 6 элементов однозначно определяет орбиту за одним исключением. Для прямолинейно-параболических и прямолинейно-гиперболических орбит необходимо указать еще на ветвь — восходящую или нисходящую.

Во-вторых, это класс всех параметризаций решения уравнения (1), не меняющих направления течения времени, т. е. вложенное в *фазовое* пространство множество точек орбиты в первом смысле слова вместе с порядком их прохождения. Орбиту определяет набор 5 элементов (положение точки  $Q$  на орбите роли не играет).

В-третьих, это проекция орбиты во втором смысле в *конфигурационное* пространство. Каждой орбите во втором смысле отвечает одна и только одна орбита в третьем смысле. Обратное верно за одним исключением: лежащие в конфигурационном пространстве на одном луче проекции неограниченных прямолинейных орбит для всех  $h \geq 0$  представляют собой одну и ту же орбиту в третьем смысле. Ситуацию иллюстрирует рис. 1, где на двумерном подпространстве  $(r, \dot{r})$  фазового пространства представлено семейство прямолинейных орбит, параметризованное энергией  $h$ . Каждому  $h \geq 0$  отвечают две орбиты (в верхней полуплоскости — восходящая, в нижней — нисходящая ветвь), имеющие горизонтальные асимптоты  $\dot{r} = \pm\sqrt{2h}$ . При  $h = 0$  обе асимптоты сливаются в одну  $\dot{r} = 0$ . При  $h < 0$  орбита одна, график простирается вправо до точки  $r = -\varkappa^2/h, \dot{r} = 0$ , в которой касательная к графику вертикальна. Прямая  $r = 0$  — общая асимптота для графиков всех орбит.

Рис. 1. Семейство прямолинейных орбит при  $h = h_n$ :  $\kappa^2 = 1$ ,  $h_1 = -0.5$ ,  $h_2 = -0.3$ ,  $h_3 = 0$ ,  $h_4 = 2$ ,  $h_5 = 7$

В-четвертых, это множество точек конфигурационного или фазового пространства, пробегаемых орбитой в первом смысле. Направление движения здесь роли не играет.

Существуют и другие значения не вполне определенного термина *орбита* — см. ниже операцию отождествления. В разных задачах астрономии нужны разные понятия орбиты. При определении орбиты нового небесного тела нужна орбита в первом смысле. При поисках родительского тела семейства астероидов или метеороидов — во втором смысле, для нахождения минимального расстояния между орбитами — в четвертом.

Пространство орбит в первом смысле тривиально: оно совпадает с фазовым пространством  $\mathbb{K}$ . Точкой в нем служит набор из шести декартовых координат векторов положения и скорости в начальную эпоху. Ниже исследуем пространство орбит во втором смысле.

Топологически все орбиты делятся на 6 типов, характеристики которых приведем в таблице.

Таблица характеристик типов орбит

Тип орбиты	$c$	$h$	$p$	$a$	$e$	dim
Эллипс	+	-	+	+	$0 \leq e < 1$	5
Окружность	+	-	+	+	0	3
Гипербола	+	+	+	-	$e > 1$	5
Парабола	+	0	+	$\pm\infty$	1	4
Прям.-элл.	0	-	0	+	1	3
Прям.-гип.	0	+	0	-	1	3
Прям.-пар.	0	0	0	$\pm\infty$	1	2

Таблица содержит все 6 типов орбит, а также один подтип — круговые орбиты, являющиеся частным случаем эллиптических. Знаки (+) и (-) поставлены вместо ( $> 0$ ) и ( $< 0$ );  $p = c^2/\kappa^2$  — фокальный параметр. В последнем столбце приведена размерность подпространства, отвечающего данному типу орбит. Интересно, что в астрономии несравненно больше внимания уделяется круговым орбитам, нежели прямолинейным, хотя соответствующие подпространства имеют одинаковую размерность.

### Пространство непрямолинейных орбит

Множество орбит представляет собой пятимерное пространство. В нем можно ввести метрику несколькими способами.

Труднее всего поддаются описанию прямолинейные орбиты. Вспомним, например, что годограф скорости любой криволинейной орбиты представляет собой окружность или ее часть, а для прямолинейной орбиты — часть прямой. Опишем сначала проще устроенное пространство  $\mathbb{H}(b)$ ,  $b \geq 0$ , состоящее из орбит с постоянной площадью  $c > b$ . Пространство  $\mathbb{H}(0)$  совпадает с пространством непрямолинейных орбит. Представляющая орбиту точка  $\mathcal{E} \in \mathbb{H}(b)$  задается набором векторных интегралов площадей и Лапласа  $(\mathbf{c}, \mathbf{e}) = (c_1, c_2, c_3; e_1, e_2, e_3)$ , связанных соотношениями

$$\mathbf{c}\mathbf{e} = 0 \quad \iff \quad c_1 e_1 + c_2 e_2 + c_3 e_3 = 0, \quad (3)$$

$$c > b \quad \iff \quad c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 > b^2. \quad (4)$$

Вектор  $\mathbf{c}$  ненулевой. Поэтому ориентированная плоскость движения, постоянная энергии, параметр, эксцентриситет, большая полу-

ось определены однозначно

$$p = \frac{c^2}{\varkappa^2}, \quad e = |\mathbf{e}|, \quad h = \frac{\varkappa^4(e^2 - 1)}{2c^2}, \quad \frac{1}{a} = \frac{\varkappa^2(1 - e^2)}{c^2}. \quad (5)$$

Направление линии апсид при  $e = 0$  безразлично, а при  $e > 0$  определяется однозначно.

Итак, мы построили  $\mathbb{H}(b)$  как вложенное в  $\mathbb{R}^6$  посредством соотношений (3,4) пятимерное многообразие. Иными словами,  $\mathbb{H}(b)$  — часть вложенного в  $\mathbb{R}^6$  пятимерного конуса второго порядка (3), расположенная вне произведения трехмерного пространства векторов  $\mathbf{e}$  на трехмерный шар  $c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 \leq b^2$  пространства векторов  $\mathbf{c}$ . При  $b = 0$  удаляемый шар схлопывается в точку  $c_1 = c_2 = c_3 = 0$ . Многообразие некомпактно. Во-первых, оно неограниченно. Во-вторых, его замыкание имеет край

$$c_1 e_1 + c_2 e_2 + c_3 e_3 = 0, \quad c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = b^2.$$

При  $b > 0$  его можно добавить в  $\mathbb{H}(b)$ , получив многообразие  $\overline{\mathbb{H}(b)}$  с краем. При  $b = 0$  этого делать нельзя. Действительно, точке  $(\mathbf{c}, \mathbf{e}) = (0, 0, 0; 2, 0, 0)$  не отвечает ни одной орбиты (прямолинейные орбиты имеют единичный вектор Лапласа), а точке  $(0, 0, 0; 1, 0, 0)$  отвечает континуум прямолинейных орбит при произвольном  $h$ .

В  $\mathbb{H}(b)$  естественно ввести метрику, отвечающую метрике объемлющего пространства  $\mathbb{R}^6$ , например евклидову. Именно, любым двум орбитам  $\mathcal{E}_k(\mathbf{c}_k, \mathbf{e}_k) \in \mathbb{H}(b)$  сопоставим расстояние между ними

$$\rho(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2) = \sqrt{\frac{1}{\varkappa^2 a_0} (\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2)^2 + (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)^2}. \quad (6)$$

Здесь  $a_0 > 0$  — имеющий размерность длины масштабный множитель. Расстояние (6) оказывается безразмерным. Если потребовать, чтобы расстояние имело размерность длины, следует  $\rho$  заменить на  $\rho^* = a_0 \rho$ .

**Теорема 1** *Пространство  $\mathbb{H}(b)$ ,  $b \geq 0$  связно.*

Доказательство. Пусть  $\mathcal{E}_k(\mathbf{c}_k, \mathbf{e}_k) \in \mathbb{H}(b)$ ,  $k = 1, 2$ . Соединим эти две точки расположенной в  $\mathbb{H}(b)$  непрерывной кривой следующим образом.

1. Начинаем с точки  $\mathcal{E}_1(\mathbf{c}_1, \mathbf{e}_1)$ . Не меняя направления  $\mathbf{e}_1$ , уменьшаем его длину до нуля. Приходим к точке  $\mathcal{E}_3(\mathbf{c}_1, 0)$ .

2. Поворачиваем  $\mathbf{c}_1$  до совпадения его направления с направлением  $\mathbf{c}_2$ . Приходим к точке  $\mathcal{E}_4\left(\frac{c_1}{c_2} \mathbf{c}_2, 0\right)$ .

3. Не меняя направления вектора площадей, изменяем монотонно его длину до длины  $\mathbf{c}_2$ . Приходим к точке  $\mathcal{E}_5(\mathbf{c}_2, 0)$ .

4. Вектор Лапласа увеличиваем в направлении  $\mathbf{e}_2$  от 0 до  $\mathbf{e}_2$ . Приходим к точке  $\mathcal{E}_2(\mathbf{c}_2, \mathbf{e}_2)$ .

Все четыре операции сохраняют соотношения (3,4). Теорема доказана.

**Теорема 2** *Пространство  $\mathbb{H}(b)$ ,  $b \geq 0$  открыто.*

Пусть  $\mathcal{E}_0(\mathbf{c}, \mathbf{e}) \in \mathbb{H}(b)$ . Повернем оси координат так, чтобы вектор площадей и вектор Лапласа имели составляющие  $\mathbf{c}(0, 0, c)$ ,  $\mathbf{e}(e, 0, 0)$ . Заметим, что поворот осей не меняет метрики (6).

Произвольная близкая к  $\mathcal{E}_0$  точка  $\mathcal{E} \in \mathbb{H}(b)$  может быть представлена в виде  $(z_1, z_2, c + z_3; e + z_4, z_5, f(z))$ , где

$$f(z) = -\frac{z_1(e + z_4) + z_2z_5}{c + z_3},$$

если

$$z_3 \neq -c, \quad z_1^2 + z_2^2 + (c + z_3)^2 > b^2. \quad (7)$$

По условию  $c > b$ , так что (7) выполняется для достаточно малых  $z_3$ . Тем более достаточно малый шар пространства  $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$  с центром в начале принадлежит множеству (7). Отождествление точек  $(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$  и  $\mathcal{E}(z_1, z_2, c + z_3; e + z_4, z_5, f(z))$  завершает доказательство.

Пространство  $\mathbb{H}(b)$  незамкнуто: если  $\mathbf{c}_n \rightarrow \mathbf{c}_0$ ,  $\mathbf{e}_n = \mathbf{e}_0$ ,  $|\mathbf{c}_0| = b$ , то последовательность  $\{\mathcal{E}(\mathbf{c}_n, \mathbf{e}_n)\}$  не имеет предела в  $\mathbb{H}(b)$ . При  $b > 0$  его можно расширить до замкнутого пространства  $\overline{\mathbb{H}(b)}$ . При  $b = 0$ , как уже сказано, этого сделать нельзя.

## Пространство орбит

Переходим к пространству всех орбит  $\mathbb{H}$ . Будем считать *одной* орбитой восходящую и нисходящую ветви неограниченных прямолинейных траекторий. В противном случае нам не удастся метризовать пространства. Например, при фиксированном  $h > 0$  и  $e \rightarrow 1, p \rightarrow 0$  гипербола приближается к совокупности двух ветвей прямолинейно-гиперболической орбиты (рис. 2). Если их считать двумя различными орбитами, то нарушится непрерывность и метризация невозможна.

При таком допущении орбита локально определяется однозначно пятью элементами и пространство орбит по-прежнему пятимерно.

*Рис. 2.* Семейство гипербол, стягивающихся к прямолинейно-гиперболической орбите;  $h = 1/2$ ,  $\varkappa^2 = 1$ ,  $p_1 = 1.6$ ,  $p_2 = 0.8$ ,  $p_3 = 0.4$ ,  $p_4 = 0.025$ ,  $p_5 = 0$

Но погрузить его теперь придется уже не в шестимерное, а в семи-мерное пространство, считая орбиту точкой  $\mathcal{E}(\mathbf{c}, \mathbf{e}, h) \in \mathbb{R}^7$ , расположенной на пятимерной алгебраической поверхности, определяемой двумя уравнениями

$$\mathbf{c}\mathbf{e} = 0, \quad 2hc^2 = \varkappa^4(e^2 - 1) \quad (8)$$

второго и третьего порядка соответственно.

Метрикой в  $\mathbb{H}$  будем считать евклидову метрику в  $\mathbb{R}^7$ :

$$\rho_1(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2) = \sqrt{\frac{1}{\varkappa^2 a_0} (\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2)^2 + (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)^2 + \frac{a_0^2}{\varkappa^4} (h_1 - h_2)^2}. \quad (9)$$

Можно ввести и имеющую размерность длины метрику  $\rho_1^* = a_0 \rho_1$ .

Как множество  $\mathbb{H}(b) \subset \mathbb{H}$  при любом  $b \geq 0$ . Очевидно,

$$\rho \leq \rho_1. \quad (10)$$

С другой стороны, для двух орбит из  $\mathbb{H}(b)$

$$h_1 - h_2 = \frac{\varkappa^4}{2c_1^2 c_2^2} [c_2^2(e_1^2 - e_2^2) + (1 - e_2^2)(c_1^2 - c_2^2)],$$

что при  $b > 0$  не превосходит по модулю величины

$$h_3 = \frac{\varkappa^4}{2b^4} |b^2(e_1^2 - e_2^2) + (1 - e_2^2)(c_1^2 - c_2^2)|.$$

Поэтому во всякой ограниченной части  $\mathbb{H}(b)$ ,  $b > 0$  найдется постоянная  $A$  такая, что

$$\rho_1 \leq A\rho. \quad (11)$$

Следовательно,  $\rho, \rho_1$  эквивалентны и задают одинаковую топологию в  $\mathbb{H}(b)$ ,  $b > 0$ .

При  $b = 0$  это уже не так. Топологии в  $\mathbb{H}(0) \subset \mathbb{H}$ , задаваемые метриками  $\rho$  и  $\rho_1$ , различны вблизи пространства прямолинейных орбит  $\mathbf{c} = 0$ . В самом деле, последовательность точек  $\mathcal{E}_n(\mathbf{c}_n, \mathbf{e}_n, h_n) \in \mathbb{H}(0)$  при

$$\mathbf{c}_n = \frac{\mathbf{c}_1}{n}, \quad \mathbf{e}_n = \mathbf{e}_1 \sqrt{\frac{n+1}{2n}}, \quad h_n = nh_1, \quad |\mathbf{c}_1| = \varkappa\sqrt{a_0}, \quad |\mathbf{e}_1| = \sqrt{2},$$

$$\mathbf{c}_1\mathbf{e}_1 = 0, \quad h_1 = \frac{\varkappa^2}{2a_0}$$

сходится в себе в метрике  $\rho$  и расходится в метрике  $\rho_1$ .

**Теорема 3** *Пространство  $\mathbb{H}$  связно.*

Доказательство. Если  $\mathbf{c}_1 \neq 0$ ,  $\mathbf{c}_2 \neq 0$ , то достаточно сослаться на теорему 1 с учетом эквивалентности метрик  $\rho, \rho_1$  в  $\mathbb{H}(b)$  при  $b = \min(c_1/2, c_2/2)$ . Если  $\mathbf{c}_1 = \mathbf{c}_2 = 0$ , то достаточно повернуть единичные векторы  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$  до совпадения и изменить  $h_1$  до совпадения с  $h_2$ .

Пусть  $\mathbf{c}_1 \neq 0$ ,  $\mathbf{c}_2 = 0$ . Повернем пару  $(\mathbf{c}_1, \mathbf{e}_1)$  так, чтобы направления  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  совпали. Затем изменим длину  $\mathbf{e}_1$  до его совпадения с  $\mathbf{e}_2$ , одновременно изменяя  $h_1$  до нуля в согласии со вторым из уравнений (8). Далее, не меняя направления  $\mathbf{c}_1$ , уменьшим его длину до нуля. Наконец, изменим  $h_1$  от нуля до  $h_2$ . Все выполненные операции не нарушали соотношения (8). Теорема доказана.

**Теорема 4** *Пространство  $\mathbb{H}$  открыто.*

Рассмотрим произвольную точку  $\mathcal{E}_1 \in \mathbb{H}$ . Если она лежит в  $\mathbb{H}(0)$ , то по теореме 2 она входит  $\mathbb{H}(0)$  вместе с некоторой окрестностью в смысле метрики  $\rho$ , а следовательно и в смысле метрики  $\rho_1$ .

Пусть  $\mathcal{E}_1$  представляет собой прямолинейную орбиту. Поворачивая оси, запишем ее координаты в виде  $\mathcal{E}_1(0, 0, 0; 0, 0, 1; h)$ . Произвольную близкую к  $\mathcal{E}_1$  точку из  $\mathbb{H}$  представим в виде

$$\mathcal{E}(z_1, z_2, f(z); z_3, z_4, 1 + g(z); h + z_5).$$

Положим для простоты  $\varkappa = 1$ , что не умаляет общности. Функции  $f, g$  определяются из условий (8):

$$z_1 z_3 + z_2 z_4 + (1+g)f = 0, \quad 2(h+z_5)(z_1^2 + z_2^2 + f^2) = z_3^2 + z_4^2 + (1+g)^2 - 1. \quad (12)$$

Обозначая временно  $x = (1+g)^2$ , найдем из первого из соотношений (12)

$$f = -\frac{z_1 z_3 + z_2 z_4}{\sqrt{x}}. \quad (13)$$

Подставляя во второе из равенств (12), получим квадратное уравнение

$$x^2 - Bx - C = 0, \quad (14)$$

где здесь и ниже

$$\begin{aligned} B &= 1 - (z_3^2 + z_4^2) + 2(h+z_5)(z_1^2 + z_2^2), & C &= 2(h+z_5)(z_1 z_3 + z_2 z_4)^2, \\ D &= B^2 + 4C = 1 - 2[(z_3^2 + z_4^2) - 2(h+z_5)(z_1^2 + z_2^2)] + \\ &+ \{(z_3^2 + z_4^2)^2 + 4(h+z_5)^2(z_1^2 + z_2^2)^2 - 4(h+z_5) * \\ & * [(z_1^2 + z_2^2)(z_3^2 + z_4^2) - 2(z_1 z_2 + z_3 z_4)^2]\}. \end{aligned}$$

Определим  $x$  как следующее решение (14):

$$x = \frac{1}{2} (B + \sqrt{D}),$$

откуда

$$g = \sqrt{\frac{1}{2} (B + \sqrt{D})} - 1, \quad f = -(z_1 z_3 + z_2 z_4) \sqrt{\frac{2}{B + \sqrt{D}}}. \quad (15)$$

Считая  $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5$  бесконечно малыми, а  $h$  фиксированным, найдем, что  $D$  положительно;  $D, B$  и  $x$  имеют порядок единицы, а  $f$  и  $g$  бесконечно малы. Таким образом, окрестность  $\mathcal{E}_1$  принадлежит  $\mathbb{H}$ , что и требовалось доказать.

### Теорема 5 *Пространство $\mathbb{H}$ замкнуто.*

Доказательство очевидно.

В заключение приведем несколько задач, полезных для лучшего усвоения материала, совсем легкого для математика, но не совсем для астронома.

1. Доказать, что для метрик  $\rho, \rho_1$  выполнены аксиомы метрического пространства.
2. Найти постоянную  $A$  в формуле (11).
3. Как совместить открытость пространств  $\mathbb{H}(0), \mathbb{H}$  и попадание круговых орбит на границу области допустимых значений  $c, h$ ?
4. Доказать теорему 5.
5. Убедиться в справедливости последнего столбца таблицы раздела 1.
6. Показать, что подпространство  $\mathbb{H}(0)$  и  $\mathbb{H}$ , отвечающее фиксированному  $\mathbf{c} \neq 0$ , двумерно и гомеоморфно двумерной плоскости.
7. Показать, что подпространство  $\mathbb{H}$ , отвечающее фиксированному  $\mathbf{c} = 0$ , трехмерно и гомеоморфно произведению двумерной сферы на прямую, т. е.  $\mathbb{R}^3$  с выколотым началом координат.
8. Показать, что подпространство  $\mathbb{H}(0), \mathbb{H}$ , отвечающее круговым орбитам, гомеоморфно  $\mathbb{R}^3$  с выколотым началом координат.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-02-17408), Программы «Университеты России» (грант УР.02.01.301) и Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1078.2003.2).

### Список литературы

1. Холшевников К. В. Топология и метрика пар кеплеровских орбит // Физика космоса: Тр. 30-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2001 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001. С. 145.
2. Kholshchevnikov K. V., Vasiliev N. N. Natural Metrics in the Spaces of Elliptic Orbits // *Celest. Mech. and Dynam. Astron.* 2004. **89**. 2. 119–125.
3. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968.

4. *Дубошин Г. Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975.
5. *Battin R. H.* An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics, Revised Edition. Reston, Virginia, USA, AIAA educ. ser. 1999.

**К. И. Чурюмов**

Астрономическая обсерватория КНУ им. Тараса Шевченко

## **КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ К ЯДРАМ КОМЕТ — ОТ ВЕГ ДО РОЗЕТТЫ**

По современным научным представлениям, ядра комет состоят из первичного вещества, которое входило в состав протопланетного облака, из которого 5 млрд лет тому назад образовались тела Солнечной системы. Следовательно, кометы были свидетелями рождения Солнца и планет и несут в себе ценную информацию о происхождении и развитии звездных и планетных миров. И вот 2 марта 2004 г. к ядру периодической кометы Чурюмова—Герасименко, открытой в Киевском университете им. Тараса Шевченко, успешно стартовала ракета Ариан с французского космодрома в Южной Америке с космическим аппаратом Розетта с целью посадки с его помощью спускаемого модуля Филы на ледяное ядро этой кометы. Такой эксперимент будет проводиться впервые в мире и он позволит раскрыть волнующую тайну рождения тел Солнечной системы, в том числе и нашей планеты Земли, и, возможно, загадку происхождения жизни на Земле.

### **Введение**

С 1986 по 2005 г. было осуществлено несколько космических миссий к ядрам кометы 1P/Галлея, 21P/Джакобини—Циннера, 19P/Боррелли, 81P/Вилда 2 и 9P/Темпеля 1, когда с помощью КА Вега-1, Вега-2, Джотто, Суисей, Сакегаке, Айс, Дип Спейс, Стардаст и Дип Импект были получены уникальные результаты о геометрических и

---

© К. И. Чурюмов, 2006

физических свойствах ядра этих комет, об элементном составе кометных пылинок, о параметрах магнитного поля вблизи ядра, о взаимодействии солнечного ветра с плазменными хвостами кометы и т. п. Тем не менее эти космические миссии поставили ряд новых, острых вопросов и оставили много новых загадок относительно кометных ядер и физических механизмов, которые отвечают за процессы газо- и пылевыведения и образование плазменных структур в головах и хвостах комет и за многое другое. Одной из главных особенностей всех комет является то, что они содержат в своих ледяных ядрах первичное вещество, которое сохранилось в Солнечной системе после образования Солнца и планет лишь в кометных ядрах и, возможно, в малых планетах. Солнце и планеты также начинали свой путь из этого загадочного вещества, но за 5 млрд лет существования Солнечной системы в результате высоких температур и давлений реликтовое вещество в них сильно изменилось и в нем невозможно найти признаков первичного вещества. И только в кометах и, возможно, в астероидах оно осталось неизменным благодаря их малой массе и отсутствию внутренних источников энергии.

Поэтому уже в 1988 г. был предложен новый уникальный проект «Розетта», целью которого стало не только сближение КА с ядром одной из короткопериодических комет семейства Юпитера и перевод его на орбиту спутника кометного ядра, но и посадка спускаемого модуля с научной аппаратурой на ядро, и доскональное исследование его химического состава и физических свойств [1–8].

Таким образом, проект Розетта разрабатывается Европейским космическим агентством уже более 15 лет. Основной задачей, поставленной перед космической миссией Розетта является изучение проблемы происхождения комет, связи между кометным и межзвездным веществом и их значения для происхождения Солнечной системы. С помощью космической миссии Розетта предполагается проведение исследования глобальных характеристик кометного ядра, определение его динамических свойств, изучение морфологии поверхностного слоя ядра и его химического состава, определение химического, минералогического и изотопного состава летучих и тугоплавких веществ в кометном ядре, определение физических свойств и соотношения летучей и тугоплавкой компоненты кометного ядра, мониторинг развития кометной активности и физических процессов в поверхностном слое ядра и внутренней коме (взаимодействие газа

и пыли), а также исследование глобальных характеристик астероидов, включая определение динамических параметров, поверхностной морфологии и состава малых планет.

Первоначально главным объектом для исследований в рамках миссии Розетта была выбрана короткопериодическая комета Виртанена, диаметр ядра которой составляет около 1 км. Именно под такое небольшое ядро и стала проектироваться вся научная аппаратура Розетты и ее спускаемого модуля Филы, который первоначально именовался просто Лендером.

Однако после неожиданной аварии с новым, более мощным типом ракеты Ариан на космодроме Куру в декабре 2002 г. ближайшие старты этой ракеты с космодрома, в том числе и намеченный на 19 января 2003 г. запуск ракеты Ариан с КА Розеттой и Лендером к комете Виртанена, были отменены. Этот факт поставил под угрозу весь дорогостоящий проект Розетта стоимостью около 1 млрд евро, так как полет к комете Виртанена стал невозможным с помощью двухступенчатой ракеты Ариан 5 — для этой цели требовалась более мощная ракета типа российского Протона. Даже начались предварительные переговоры с российским космическим агентством о предоставлении для проекта Розетта ракеты Протон, чтобы отправить на нем Розетту в 2004 г. к комете Виртанена. Одновременно стали изучаться возможности и других короткопериодических комет семейства Юпитера как возможных кандидатов в качестве главной цели проекта Розетта. Вскоре расчеты небесных механиков показали, что единственной кометой среди известных около 200 на сегодняшний день периодических комет для такой цели является короткопериодическая комета 67P/Чурюмова—Герасименко. Ожесточенные дискуссии велись вплоть до 11 мая 2003 г., так как большинство специалистов-разработчиков приборов для Розетты настаивали на сохранении статуса главной цели для Розетты за кометой Виртанена. Но на совещании Европейского космического агентства (ЕКА) 11—13 мая 2003 г. было принято окончательное решение руководства ЕКА относительно главной цели Розетты, которой оказалась короткопериодическая комета, открытая 35 лет тому назад в Киеве — комета 67P/Чурюмова—Герасименко.

Название миссии — это аббревиатура названия проекта на английском языке, которая удачно совпадает с названием древнего города Розетта, который находился в дельте реки Нил и вблизи которого французским капитаном армии Наполеона Пьером Бушаром 15 июля 1799 г. была найдена базальтовая плита или, иначе, зна-

менитый розеттский камень. На нем сохранились записи одного и того же текста, но на трех языках: древнеегипетском (иероглифами), коптском (египетским демотическом шрифтом) и древнегреческом. Коптский и древнегреческий язык знали хорошо, и это дало возможность впервые Томасу Янгу и Жану Франсуа Шампольйону в 1822 г. расшифровать древнеегипетские иероглифы, что позволило открыть всему миру интереснейшую историю древнего Египта. Эти три текста были нанесены на плиту в 196 г. до Р. Х. и представляли собой благодарственную надпись египетских жрецов царю Птолемею V Епифану, который руководил Египтом в 204—180 гг. до Р. Х. Розеттский камень хранится в Лондоне в Британском музее, хотя Египет требует возвращения этой исторической национальной святыни на родину. Символическое название миссии Розетта и состоит в том, что ядро кометы Чурюмова—Герасименко после посадки на него посадочного модуля, который доставит космический аппарат «Розетта», сыграет своеобразную роль розеттского камня для расшифровки тайн ледяных кометных ядер, носителей загадочного реликтового вещества Солнечной системы, а от них прямой путь к решению фундаментальной проблемы космогонии Солнечной системы и происхождения жизни на Земле. Один из приборов на борту Розетты называется «Птолемей», его назначение — анализ газов, которые выделяются из ядра кометы. Из других приборов, установленных на спускаемом модуле, который отделится от КА «Розетта», следует назвать прибор «Концерт», который с помощью радиоволн позволит изучить внутреннее строение ядра кометы Чурюмова—Герасименко, а также очень чувствительный прибор «Козак» (аббревиатура от «Cometary Sampling and Composition Experiment») для изучения химического состава и структуры вещества на поверхности кометного ядра и т. п.

### **Краткая история кометы 67P/Чурюмова—Герасименко**

Летом 1966 г. кафедра астрономии Киевского государственного университета имени Т. Г. Шевченко снарядила и отправила первую кометную экспедицию в Таджикистан на гору Санглок с целью наблюдений и поисков комет как фотографическими, так и визуальными способами. В 1968 г. Вторая кометная экспедиция КГУ проводила наблюдения и поиски комет в Туркменистане на горе Душак. А в 1969 г. мы со Светланой Ивановой Герасименко, которая тогда

была аспирантом профессора С. К. Всехсвятского, в составе Третьей кометной экспедиции КГУ оправившись в Казахстан в Алмаатинскую обсерваторию астрофизического института имени академика АН СССР В. Г. Фесенкова. Нас привлек имеющийся там светосильный 0.5-метровый менисковый максутовский рефлектор. С его помощью мы организовали патрулирование нескольких короткопериодических комет семейства Юпитера, отсняли много фотопластинок и выполнили их исследования. На пяти снимках мы нашли диффузный объект, который сначала приняли за периодическую комету Кома—Сола, которую мы и снимали на эти же пластинки. Позднее, когда мы вернулись из экспедиции в Киев, выяснилось, что этот объект по координатам отличается на 2 градуса от теоретического положения кометы Кома—Сола. Это вызвало у нас удивление, и мы начали искать таинственный объект на других снимках. И еще на четырех снимках почти на самом краю пластинок обнаружили этот же объект. Пять его точных положений, определенных по снимкам, давали возможность точно вычислить орбиту кометы. Она оказалась эллиптической и принадлежала до сих пор неизвестной короткопериодической комете с периодом 6.5 года. О нашем открытии мы сообщили в Центральное бюро астрономических телеграмм в США доктору Б. Марсдену, где фиксируются открытия объектов во Вселенной и Солнечной системе. Через несколько дней нам пришло сообщение, что это действительно новая комета, и ее зарегистрировали как комету 1969h или комету Чурюмова—Герасименко. Сейчас эта комета имеет постоянный номер 67P во всех каталогах комет. С момента открытия эта комета уже возвращалась к Земле 6 раз. И вот перед ее седьмым появлением вблизи Солнца к комете отправлен КА «Rosetta», который достигнет ее в 2014 г. Интересной оказалась и динамическая история кометы 67P, т. е. эволюция ее орбиты в прошлое. Оказалось, что за 10 лет до открытия в 1959 г. комета прошла от Юпитера на очень близком расстоянии в 0.05 а. е., или 7.5 млн км, что существенно трансформировало все элементы ее орбиты и главным образом перигелийное расстояние, которое до этого сближения превышало 2.5 а. е., а после сближения уменьшилось до 1.3 а. е. Именно после такого заметного изменения орбитальных элементов комета стала доступной для фотографических наземных наблюдений с телескопами, благодаря чему, попав в поле зрения нашего менискового телескопа в Алма-Ате, и была открыта мной и Герасименко.

Элементы орбиты кометы 67P в ее шестом появлении в 2002 г.:

- наклонение орбиты  $7.12^\circ$ ;
- расстояние от Солнца в перигелии 1.292 а. е.;
- расстояние от Солнца в афелии 5.722 а. е.;
- период обращения 6.567 года;
- дата прохождения перигелия 18 августа 2002 г.

### **Конференция на острове Капри «Цели миссии “Розетта”»**

Миссии «Розетта» было посвящено несколько больших международных конференций — в Голландии, Австралии, Венгрии, Италии и других странах. Так, например, по проблемам миссии «Rosetta» 12—15 октября 2003 г. была проведена международная научная конференция в Италии, на острове Капри, посвященная главным образом комете, к которой летит «Rosetta». Там был рассмотрен точный график полета КА «Розетта» к комете Чурюмова—Герасименко, обсужден комплект приборов, которые будут задействованы в эксперименте, проанализированы результаты наземных наблюдений и исследований этой кометы в 2003 г. Автор принимал участие в этой конференции по приглашению Европейского космического агентства и выступил там с устным 30-минутным докладом об открытии и исследовании кометы 67P/Чурюмова—Герасименко в Киевском национальном университете им. Тараса Шевченко. Эта информация оказалась очень важной для миссии «Розетта», до старта которой оставалось тогда не так уж и много времени.

Один из ключевых приборов под названием АЛИСА космической миссии, который будет установлен на орбитальном модуле Розетта, был продемонстрирован на каприйской конференции профессором Эленом Стерном, руководителем проекта «Новые горизонты» космической миссии на планету Плутон и в пояс Койпера. Прибор массой 2.35 кг предназначен для получения ультрафиолетовых спектров кометной атмосферы (в далеком ультрафиолете 700—2050 Å) вблизи поверхности ядра и изучения в ней обилия атомов углерода, водорода, кислорода, азота и серы, а также содержания благородных газов — гелия, неона, аргона, криптона и др. Как заявил на конференции Э. Стерн, АЛИСА готова для установки на Розетте на 100 %. В перерыве заседаний автор побеседовал со Стерном по поводу его

космического проекта к Плутону, о возможностях его АЛИСЫ и поддержал прибор в своих руках. Автор поблагодарил Элена Стерна за создание такого уникального прибора, который довольно легкий, компактен и обладает высокой чувствительностью, точностью и информативностью. Э. Стерн со своей стороны поблагодарил автора за открытие вместе с С. Герасименко уникальной кометы, которая в случае успеха всей космической миссии прольет свет на многие тайны Солнечной системы и в первую очередь на ее раннюю историю. Сейчас мощнейшие телескопы мира — космический телескоп Хаббл (HST) и телескоп Европейской южной обсерватории ВЛТ (на английском языке VLT или Very Large Telescope), расположенный в пустыне Атакама (Чили), в течение всего 2003 г. были нацелены на комету Чурюмова—Герасименко. Много снимков этой кометы, полученных с помощью космического телескопа Хаббла, сейчас можно найти в Интернете. На основе этих наблюдений были определены размеры ядра кометы Чурюмова—Герасименко  $3 \times 5$  км (эффективный радиус ядра 1.98 км), период обращения вокруг собственной оси 12 ч (то есть сутки на комете 67P равны 0.5 земных суток) и приблизительно определена форма ядра кометы, которая напоминает гигантский крест, если смотреть с полюса ядра, и шляпу, если смотреть на ядро сбоку (рис. 1).

*Рис. 1.* Ядро кометы 67P/Чурюмова—Герасименко, по данным наблюдений с помощью телескопа Хаббла в 2003 г.

Одно из последних наблюдений кометы Чурюмова—Герасименко было сделано 26 февраля 2004 г. с помощью 8-метрового Very Large Telescope Европейской южной обсерватории в Чили. Комета находилась в это время на расстоянии почти в 60 млн км от Солнца и, естественно, не имела ни комы, ни хвоста. Именно на такое голое безатмосферное ядро кометы 67P и будет совершена посадка модуля Филы в 2014 г.

## **Успешный старт ракеты-носителя Ариан 5 с КА Розеттой и Филами**

В феврале—марте 2004 г. автор был приглашен в Германию в институт аэронавтики Макса Планка его директором профессором Гельмутом Розенбауером, главным специалистом по посадочному модулю Филы на ядро кометы. Этот институт давно зарекомендовал себя с самой лучшей стороны разработкой и изготовлением высокоточных приборов для установки их на многих космических аппаратах, в том числе и на Розетте.

Из Германии я по приглашению генерального директора Европейского космического агентства Жан-Жака Дордена вылетел из Парижа специальным рейсом (VIP flight № 158) во Французскую Гвиану на космодром Куру, где велись приготовления к старту № 158 ракеты Ариан 5 с Розеттой на борту.

Первая попытка запуска ракеты Ариан состоялась в 4 ч 16 мин 00 с (по всемирному времени) 26 февраля 2004 г. Однако из-за сильного ветра в высоких слоях атмосферы, облачности и дождя старт был перенесен на утро 27 февраля. Но и вторая попытка на следующий день сорвалась из-за неисправности теплоизоляции одного из двигателей ракеты Ариан. Так как окно для запуска Розетты к комете было открыто еще до 21 марта 2004 г., то после исправления досадной неисправности с теплоизоляцией 2 марта 2004 г. в 07:17:44 UTC с площадки ELA3 космодрома Куру во Французской Гвиане успешно стартовала ракета-носитель Ariane-5G+ (это по счету был 158-й пуск ракеты Ариан на космодроме КУРУ), которая вывела в космос европейский межпланетный зонд Rosetta (28169/2004 006A). Через 2 ч 15 мин после старта произошло успешное отделение КА «Розетта» от второй ступени ракеты Ариан, раскрылись панели солнечной батареи, после чего КА Розетта с посадочным модулем Филы вышла на заданную траекторию полета. Через несколько дней полета, когда орбита стабилизировалась, небесные механики просчитали де-

тальный сценарий миссии, согласно которому Розетта для того, чтобы с расчетной точностью приблизиться к ядру кометы Чурюмова—Герасименко, должна совершить три гравитационных маневра вблизи Земли и один возле Марса. Сейчас Розетта совершает свой первый виток по околосолнечной орбите, чтобы в марте 2005 г. вернуться к Земле и, получив от нее первый гравитационный импульс, направиться вокруг Солнца к Марсу. В марте 2007 г. второй виток Розетты по уже слегка вытянутой околосолнечной орбите завершится пролетом вблизи красной планеты на высоте около 200 км, так как именно на такой пролетной высоте над Марсом Розетта получит от него второй ускоряющий гравитационный импульс, который еще больше растянет околосолнечный орбитальный эллипс Розетты и отправит ее к Земле. При пролете вблизи Марса приборы Розетты проведут детальное картографирование поверхности Марса и другие исследования. В ноябре 2007 г., пролетая вблизи Земли, Розетта получит третий гравитационный импульс на своем третьем витке и отправится к Солнцу по еще больше вытянутой эллиптической орбите.

Обогнув Солнце, Розетта 5 сентября 2008 г., находясь в главном поясе астероидов, приблизится на 1700 км к астероиду Штейнс (№ 2867) и передаст на Землю его изображения и другие научные данные о нем. Эта малая планета 2867 была открыта 4 ноября 1969 г. Николаем Степановичем Черныхом в Крыму и названа в честь известного латышского астронома, специалиста по космогонии комет. Это двойной астероид диаметром около 10 км. Двигается по эллиптической орбите с большой полуосью  $a = 2.36$  а. е., эксцентриситетом  $e = 0.146$  и наклоном  $i = 9.9^\circ$ . Возвращаясь из пояса астероидов к Солнцу, Розетта в ноябре 2009 г. пролетит вблизи Земли и совершит свой четвертый гравитационный маневр и перейдет на окончательную орбиту полета к комете Чурюмова—Герасименко. Обогнув в четвертый раз Солнце, Розетта 10 июля 2010 г. пролетит вблизи крупного астероида Лютеция (№ 21) диаметром 99 км и сфотографирует его. Астероид 21 Лютецию открыл 15 ноября 1852 г. Г. Гольдшмидт. Он движется по эллиптической орбите с большой полуосью  $a = 2.43$  а. е., эксцентриситетом  $e = 0.163$  и наклоном  $i = 3.1^\circ$ . Такой крупный астероид будет исследоваться с помощью КА впервые.

После пролета вблизи Лютеции все приборы Розетты будут переведены в «спящий» режим почти на 4 года до подлета к ядру кометы Чурюмова—Герасименко. В мае 2014 г. Розетта снизит свою

скорость относительно ядра кометы до 2 м/с, приблизится к нему на расстояние 25 км и перейдет на орбиту искусственного спутника ядра кометы Чурюмова—Герасименко. Все приборы Розетты будут приведены в полную готовность, чтобы начать систематические исследования ядра и околоядерной области кометы. В это время будет проведено полное и детальное картографирование поверхности ядра кометы, которое позволит впервые в мире построить детальный «глобус» ядра кометы. Подробный анализ поверхности ядра кометы даст возможность выбрать пять площадок на его поверхности для безопасной посадки спускаемого модуля Филы. В ноябре 2014 г. будет проведен самый сложный и главный этап всей миссии Розетта — отделение от орбитального модуля спускаемого зонда «Филы» и посадка его на одну из 5 выбранных для этой цели безопасных площадок на ядре кометы. При этом будет включен двигатель на Филах, который погасит скорость зонда до величины меньше 1 м/с. Филы совершит мягкую посадку сперва на одну из трех его ножек, затем обопрется и на две другие ножки, когда они коснутся кометного грунта. При касании второй ножки из зонда выдвинется специальный гарпун, который, проникнув в кометный грунт, закрепит модуль Филы на кометном ядре и сделает его положение надежно устойчивым. После закрепления Фил на кометном ядре, 9 приборов установленных на нем, по команде с Земли будут «расчехлены» и приступят к главной задаче миссии — комплексному исследованию загадочного реликтового вещества кометного ядра и Солнечной системы.

Филы — это уникальный научный контейнер массой около 21 кг. На нем установлено 9 приборов: спектрометр альфа-лучей, протонов и рентгеновских лучей (АРХ) для исследования элементного состава кометного вещества; газохроматограф и масспектрограф КО-ЗАК и МОДУЛУС/ПТОЛЕМЕЙ для исследования химического состава, изотопного состава и идентификации сложных органических молекул в кометном веществе; СЕЗАМ для акустического исследования вещества поверхностного слоя ядра, измерения диэлектрических свойств среды, окружающей ядро и мониторинга столкновений с пылевыми частицами; МУПУС для изучения физических свойств вещества кометы; КОНЦЕРТ для исследования электрических характеристик всего ядра и его внутренней структуры; РОМАП для исследования кометного магнитного поля и его взаимодействия с солнечным ветром; СИВА для получения изображений рельефа ядра в месте посадки Фил и РОЛИС для обеспечения бурения кометного

грунта и исследования вещества, которое находится под поверхностным слоем ядра, для изучения распределения и величины электрических зарядов на ядре и в образцах кометного грунта, который будет помещен в специальный коллектор.

На орбитальном модуле Розетта будут работать следующие приборы: ОЗИРИС, АЛИСА, ВИРТИС, МИРО — для получения дистанционным путем прямых изображений поверхности ядра и спектральных исследований ядра и околоядерной области; РОЗИНА, КОЗИМА, МИДАС — для анализа химического состава кометного вещества; КОНЦЕРТ — для исследования крупномасштабной структуры ядра совместно с аналогичным прибором, установленным на Филах; ГИАДА — для исследования потока пыли и распределения пылевых частичек по массам; РПС — для исследования кометной плазмы и ее взаимодействия с солнечным ветром; РСИ — для исследования кометы с помощью радиоволн. С модуля Филы научные данные, полученные каждым из его 9 высокоточных и чувствительных приборов, будут передаваться на орбитальный модуль Розетту, а оттуда с помощью радиотелескопа вместе с данными, полученными 11 приборами Розетты, вся научная информация будет передаваться на Землю.

Для питания приборов космической орбитальной лаборатории будет использоваться солнечная батарея площадью 32 м<sup>2</sup>. С помощью 2-м антенны радиотелескопа, установленного на Розетте, впервые в истории науки будут поступать в научные лаборатории на Земле уникальные данные о реликтовом веществе Солнечной системы. Многие ученые считают, что это эксперимент тысячелетия, а по количеству израсходованных на него средств — большее 1 млрд евро — это будет наиболее дорогой эксперимент в истории науки, но «игра стоит свеч». Без всякого сомнения, это уникальный эксперимент в истории человеческой цивилизации.

### **Первые результаты наблюдений с борта КА «Розетта»**

Проверка работы научной аппаратуры Розетты была проведена на яркой комете C/2002 T7 (LINEAR), которую можно было увидеть на небе невооруженным глазом в конце апреля и в первых числах мая 2004 г. С этой целью были активизированы приборы зонда Rosetta: камера OSIRIS и три спектрометра — ALICE, MIRO и VIRTIS —

работающие в разных диапазонах длин волн, от ультрафиолета до микроволнового излучения. При этом впервые было проведено одновременное включение всех этих приборов.

Полученные данные подтвердили надежную работу научной аппаратуры зонда. В частности, с помощью камеры OSIRIS с расстояния около 95 млн км были получены высококачественные снимки кометы в синем свете, на которых четко видны ядро кометы и ее хвост длиной около 2 млн км. А с помощью спектрометров в атмосфере околоядерной области кометы C/2002 T7 были обнаружены молекулы воды. 10 и 15 мая 2004 г. были проведены первые корректировки траектории движения зонда Rosetta в дальнем космосе, а первый этап его ввода в эксплуатацию планируется завершить в течение первой недели июня. Затем зонд Rosetta в сентябре 2004 г. был переведен в режим крейсерского полета, а затем начался второй этап его ввода в эксплуатацию с проверкой системы наведения и исследования влияния внешних факторов на показания приборов. Все эти работы продолжались до декабря 2004 г. В марте 2005 г. Розетта сблизилась с Землей и ускорила свое движение, в результате чего перешла на эллиптическую орбиту с большим, чем предыдущий, эксцентриситетом. Последующие сближения с Марсом и Землей и новые ускорения Розетты произойдут в марте и ноябре 2007 г.

Напомним, что конечная цель миссии зонда Rosetta — выход на орбиту вокруг ядра кометы Чурюмова—Герасименко и спуск на него небольшого аппарата Philae. Все это в конечном итоге делается для исследования процесса образования Солнечной системы, начавшегося более 5 млрд лет тому назад, и определения «вклада» комет в возникновение жизни на Земле.

### Список литературы

1. *Churyumov K. I.* Discovery, observations and investigations of comet 67P/Churyumov—Gerasimenko in Kyiv // The new ROSETTA targets. Kluwer acad. Publ. Collangelli et al. (eds). 2004. P. 1—13.
2. *Чурюмов К. И.* Открытие комет в Украине // Одесский астроном. календарь.: Астропринт. 2002. С. 150—157.
3. *Churyumov K. I.* Past and future space missions to the comet nuclei. 10th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics. Kyiv, 2003.

4. *Churyumov K. I.* ROSETTA, DEEP IMPACT and other space missions to comets. Book of Abstracts of 11th YSC. 2004.
5. *Churyumov K. I.* «Rosetta», «Deep Impact» and other space missions to comets // Горизонты Вселенной: Тез. докл. ВАК-2004. 2004. С. 97.
6. *Churyumov K. I.* Space mission Rosetta to the nucleus of comet 67P/Churyumov—Gerasimenko: goals, successful start and first observations. Book of abs. of Gamow memorial intern. conf. Astrophysics and Cosmology after Gamow — theory and observations. 2004.
7. *Churyumov K. I.* Rosetta space mission to comet 67P/Churyumov—Gerasimenko. Abstract book Astronomy in Ukraine — Past, Present and Future // МАО. 2004.
8. *Churyumov K. I.* Discovery and study of comet 67P/Churyumov—Gerasimenko — the main target of the Rosetta space mission // Ibid.

**Б. М. Шустов**  
Институт астрономии РАН

#### **ОБСЕРВАТОРИЯ В ТЕРСКОЛЕ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

На пике Терскол расположена самая высокогорная в Европе и вторая по величине в России обсерватория оптического диапазона. До 2005 г. она действовала в составе Международного центра астрономических и медико-экологических исследований, учрежденного Академиями наук России, Украины и Правительством Кабардино-Балкарии в 1992 г. С начала 2005 г. Терскольская обсерватория работает в составе Института астрономии РАН. Лекция содержит информацию о людях, инструментах, направлениях работы, перспективах и др., т. е. то, что особенно полезно для студентов и молодых специалистов, выбирающих свой путь в науке.

В. В. Шиманский<sup>1</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>1</sup>,  
Н. А. Сахибуллин<sup>1</sup>, Н. Н. Шиманская<sup>1</sup>,  
Н. В. Борисов<sup>2</sup>, С. А. Позднякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный университет

<sup>2</sup> Специальная астрофизическая обсерватория

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА БТА САО И РТТ КГУ

Представлен обзор результатов исследований предкатаклизмических переменных разных типов на основе фотометрических и спектроскопических наблюдений.

### Введение

Использование с начала 90-х гг. ПЗС-матриц больших размеров и разработка на их основе фотометров и спектрометров высокой чувствительности позволили радикально улучшить наблюдательную базу современной астрофизики. Достаточно сказать, что новейшие ПЗС-инструменты имеют преимущества по сравнению с их фотографическими аналогами по спектральному разрешению в 3–10 раз, по регистрируемому диапазону в 2–3 раза, а по чувствительности до 200 раз! Это дает возможность перейти от феноменологического анализа сложных астрофизических объектов к их массовому, количественному моделированию, непосредственно опирающемуся на наблюдаемые спектральные и фотометрические характеристики. Областью астрофизики, где прогресс оказался наиболее очевидным, является теория формирования, строения и эволюции тесных двойных систем. Ряд исследований таких объектов, выполненных в последнее время на кафедре астрономии КГУ, представлен нами ниже.

### Результаты

Предкатаклизмические переменные (ПП) являются недавно выделенным (Риттер, 1986), компактным (около 70 членов) классом

---

© В. В. Шиманский, И. Ф. Бикмаев, Н. А. Сахибуллин,  
Н. Н. Шиманская, Н. В. Борисов, С. А. Позднякова 2006

тесных двойных систем, включающих нормальные, холодные звезды и горячие остатки эволюции их спутников — белые карлики или голубые субкарлики. Характерной особенностью объектов является отсутствие прямого механического взаимодействия компонент при их тесной близости. В этих условиях главным фактором, влияющим на наблюдаемые характеристики систем, оказываются эффекты отражения, вызванные поглощением и переработкой излучения горячей компоненты на поверхности холодной. Такие эффекты приводят к появлению периодических колебаний блеска звезд и к появлению в спектрах эмиссионных линий. Методика точного моделирования эффектов отражения, разработанная на кафедре астрономии (Сахибуллин, Шиманский, 1997), позволила превратить их из серьезного препятствия на пути исследования ПП в мощный инструмент анализа. Для практической реализации методики в 1999–2005 гг. на 6-м и 1-м телескопах САО РАН и 1.5-м телескопе РТТ КГУ выполнены масштабные спектроскопические и фотометрические наблюдения более 10 ПП разных типов, а также более 20 кандидатов в такие объекты. Анализ полученных данных показал, что необходима внутренняя классификация систем на старые ПП, содержащие остывающие белые карлики, и молодые ПП с субкарликами В-типа ( $T_{eff} = 20000\text{--}40000\text{K}$ ) и О-типа ( $T_{eff} = 40000\text{--}130000\text{K}$ ). Такая классификация подтверждается наблюдаемыми свойствами звезд, их физическим состоянием и связью с предыдущей и последующей фазой эволюции ПП. При исследовании членов каждой из названных групп мы пришли к следующим выводам.

1) Формирование излучения всех ПП происходит главным образом под действием эффектов отражения. Влияние звездного ветра, внутренних магнитных полей звезд, горизонтального переноса энергии на их поверхностях для систем с температурой горячих компонент выше  $T_{eff} = 20000\text{K}$  незначительно.

2) Старые ПП (**MS Peg**, **LM Com**, **HR Cam**, **EG UMa**) не имеют следов влияния предшествующей фазы эволюции — фазы общей оболочки, их вторичные компоненты находятся в спокойном состоянии с параметрами, характерными для звезд Главной Последовательности. Моделирование эффектов отражения, спектров и кривых блеска старых ПП может адекватно выполняться в рамках приближения термодинамического равновесия в атмосферах звезд. Полученные таким образом фундаментальные параметры старых ПП имеют наиболее высокий уровень точности. Дополнительно нами предложен и реализован новый метод поиска и идентификации таких

объектов на основе спектроскопических наблюдений линии  $SiI \lambda 3905 \text{ \AA}$ . В результате обнаружена новая система **PG 2200+085** с орбитальным периодом  $P_{orb} = 0.^d316$ , принадлежащая к типу старых ПП с массивной вторичной компонентой К-класса и белым карликом без признаков водородных линий в спектрах.

3) Исследование кривых блеска молодых ПП с В-субкарликами (**HW Vir, NY Vir**), выполняемое с учетом эффектов несферичности компонент и отражения, позволяет аккуратно определить только часть их фундаментальных параметров. Однако отсутствие в спектрах систем линий, связанных с излучением вторичных компонент, создает серьезную трудность на пути их всестороннего изучения. Разработанный нами метод тонкого анализа профилей водородных линий с выявлением в них слабых эмиссий позволит в дальнейшем разрешить данную проблему, что подтверждено последними наблюдениями молодой ПП **AA Dor**. В результате поиска молодых ПП с В-субкарликами обнаружена новая тесная система **PG 1000+408** с орбитальным периодом  $P_{orb} = 1.^d04114$ , состоящая из двух вырожденных объектов.

4) Моделирование эффектов отражения в молодых ПП с О-субкарликами (**V664 Cas, V477 Lyr, BE UMa**) позволило впервые непосредственно на основе анализа наблюдательных данных изучать их физическое состояние и определять полные наборы фундаментальных параметров. При этом обнаружено, что холодные компоненты всех систем находятся в возбужденном состоянии со светимостью, превышающей нормальную до 20 раз! Этот факт свидетельствует об остаточном влиянии фазы общей оболочки на современное состояние молодых ПП. Сравнение характеристик вторичных компонент 10 молодых ПП показывает уменьшение их избыточной светимости с увеличением времени существования систем после сброса общей оболочки при среднем периоде полуохлаждения около 150000 лет. Одновременно нами обнаружены эффекты поглощения оптического излучения молодых ПП в плотных планетарных туманностях, приводящие к формированию двухпиковых профилей бальмеровских линий. Исследования спектров малоизученных ядер планетарных туманностей позволило открыть молодую ПП с орбитальным периодом  $P_{orb} = 1.^d0036$  в туманности **Abell 65**.

Таким образом, на основе методики моделирования эффектов отражения нами определены фундаментальные параметры ряда ПП в каждой из групп, установлен эволюционный статус 4 слабоизученных объектов, а также открыты 3 новые ПП разных типов. Кроме

того, в процессе работы созданы методы анализа наблюдательных данных наивысшего качества. Получение подобных данных становится возможным только с внедрением на современных телескопах фотометров с матрицами глубокого охлаждения и редукторов светосилы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-17744).

### Список литературы

1. *Ritter H.* // *A&A.* 2003. Vol. 404/ P. 301.
2. *Сахибуллин Н. А., Шиманский В. В.* // *Астроном. журн.* 1997. Т. 74. С. 432.
3. *Шиманский В. В.* // Там же. 2002. Т. 79. С. 145.
4. *Шиманский В. В., Борисов Н. В.* // Там же. 2002. Т. 79. С. 450.
5. *Шиманский В. В., Борисов Н. В., Сахибуллин Н. А. и др.* // Там же. 2002. Т. 79. С. 726.
6. *Шиманский В. В., Борисов Н. В., Шиманская Н. Н.* // Там же. 2003. Т. 80. С. 830.
7. *Шиманский В. В., Борисов Н. В., Сахибуллин Н. А. и др.* // Там же. 2004. Т. 81. С. 620.

# Тезисы студенческих докладов

Р. В. Балугев

Санкт-Петербургский государственный университет

## ОСВОБОЖДЕНИЕ СТАТИСТИКИ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ ОТ ЭФФЕКТОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ

Подавляющее большинство из 170 известных к настоящему времени кандидатов в экзопланеты открыто методом лучевых скоростей (по периодическим вариациям лучевой скорости центральной звезды). Очевидно, такой метод вносит ряд существенных искажений в распределения различных характеристик экзопланет. В работе проводится изучение влияния эффектов селекции и предлагаются способы их исключения. Основное внимание уделяется «эффекту неизвестного наклона», что приводит к систематическому занижению значений масс планет.

Данные исследования ориентированы на использование метода анализа одномерных распределений с помощью вейвлет-преобразований. Последний метод, представленный автором в законченном виде в работе [1], нацелен на поиск (выявление) в распределении неоднородных структур (таких как концентрации или разрежения) и имеет в такой ситуации существенно большую эффективность, чем традиционные статистические методы анализа распределений.

Было получено, в частности, что для учета «эффекта неизвестного наклона» с точностью, достижимой с текущим объемом выборки экзопланет, достаточно лишь умножить их наблюдаемые массы на коэффициент  $e/2 \approx 1.359$  ( $e \approx 2.718$  — неперово число).

### Список литературы

1. *Baluyev R.V.* Statistics of masses and orbital parameters of masses and orbital parameters of extrasolar planets using continuous wavelet transforms // Tenth anniversary of 51 Peg – b: Proc. of Haute Provence Observatory Colloquium (22–25 aug. 2005). In press.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСТЕРОИДОВ

Одной из наиболее актуальных задач современной астрономии является проблема астероидно-кометной опасности. В рамках этой задачи необходимо изучение физических свойств астероидов, закономерностей их распределения в Солнечной системе, а также процессов миграции.

В данной работе приводятся результаты статистического исследования и сопоставления физических и орбитальных характеристик астероидов главного пояса по данным Лоуэльской обсерватории.

В качестве основного параметра, характеризующего химический состав и отражательные свойства поверхности малых тел, рассматриваются таксономические классы [1]. Астероиды с однозначно определенным классом отнесены к суперклассам — примитивные (C, D, P, K) и «вулканического происхождения» (S, R, V, A, M, E) [2]. Для данных суперклассов получены распределения по орбитальным параметрам и линейным размерам, выделены различия распределений по большим полуосям и диаметрам. Дана возможная интерпретация полученных распределений.

### Список литературы

1. *Tholen D.* Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry... Ph. D. Thesis. University of Arizona, 1984.
2. *Bell J. F., Davis D. R., Hartmann W. K. et al.* Asteroids: the big picture // Asteroids II, Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989.

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЗС ИЗОБРАЖЕНИЙ  
РАСSEЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ  
КАМЕРЫ SBG**

Камера SBG предназначена для наблюдения ИСЗ и имеет маленький масштаб изображений, поэтому при наблюдении звездных скоплений возникают трудности, связанные с большой плотностью звезд на изображении. Создана программа для фотометрической обработки ПЗС изображений камеры SBG, учитывающая вытянутость некоторых изображений звезд и влияние близких соседних звезд. Проведена обработка четырех кадров рассеянного скопления M67 в полосе V системы UVV, полученных весной 2005 г. Д. В. Гламаздой. Для получения величин V использованы стандарты, взятые из работы Эггена и Сэндиджа. Обработка полученных изображений с помощью нашей программы, показала следующее. За экспозицию в 1 мин на кадрах получают звезды 16.5 зв. величины, при этом звезды в интервале V от 10.5 до 16.5 зв. величин показывают линейную связь между отсчетами и зв. величинами. Более яркие звезды также ложатся на линейную зависимость, но с другим наклоном. Средняя ошибка одного измерения, полученная по 4 кадрам, составляет 0.09 зв. величины, хотя в интервале V от 10.5 до 14 зв. величин ошибка меньше средней в 2 раза. Опыт показал, что главная причина случайных ошибок фотометрии — небольшое число пикселей на изображение звезды. Увеличение точности обработки может быть достигнуто путем увеличения времени экспозиции, в особенности для слабых звезд, а также усовершенствованием методик получения кадров плоского поля и темновых кадров. Точность может быть также улучшена за счет увеличения количества снимков. В будущем предполагается включить в программу астрометрическую обработку с целью получения экваториальных координат измеряемых объектов. Первые измерения показали, что телескоп SBG с имеющейся ПЗС-камерой можно использовать для фотометрических исследований звездных скоплений.

**А. А. Волосатов**  
Санкт-Петербургский государственный университет

## **РОЛЬ СМЯГЧАЮЩЕГО ПАРАМЕТРА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТЕНЦИАЛЕ И НАПРЯЖЕННОСТИ СПИРАЛЬНОЙ НИТИ**

Гравитационный потенциал спиральной нити, как и любого другого одномерного тела, терпит разрыв второго рода при неограниченном приближении к ней. Чтобы устранить его, предлагается ввести в рассмотрение смягчающий параметр. При этом возникает ряд эффектов, свойственных данному подходу, в частности изменяется распределение массы и спираль перестает быть одномерной. Также происходит и качественное изменение вида напряженности, при котором у нее вместо разрывов появляются корни. В данной работе рассмотрены один из общих подходов к введению смягчающего параметра и пара его частных случаев.

Получены выражения для плотности и напряженности, соответствующие «смягченному» потенциалу. В качестве иллюстраций к данной работе построены графики потенциала до и после введения смягчающего параметра, графики компонент напряженности и сечения эквипотенциалей меридиональными плоскостями.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ  
КВАДРАТОВ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ  
ВОЗМОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ АСТЕРОИДОВ**

В докладе рассматривается правомерность использования линейных оценок в нелинейных задачах наименьших квадратов (НК). Показано, что при построении областей возможных движений астероидов, наблюдавшихся в одном появлении, задача НК может быть существенно нелинейной. По данным реальных наблюдений 70 астероидов, а также решения модельных задач были получены следующие результаты.

1. В вероятностной области, размеры и ориентация которой определяется матрицей ковариаций МНК-оценок начальных параметров орбиты, связь между вероятностными вариациями измеряемых параметров и вариациями начальных параметров орбиты может быть существенно нелинейной.
2. Степень нелинейности задачи МНК существенно зависит от выбора состава начальных параметров.
3. Лучшей системой начальных параметров при определении матрицы ковариаций является система декартовых переменных (прямоугольные координаты и скорости).
4. Из оценок областей вероятностного движения рассмотренных астероидов, наблюдавшихся на мерных интервалах до 90 суток, найдено, что использование линейной модели МНК неправомерно для 29 астероидов даже в случае использования декартовых переменных. В случае же использования кеплеровых элементов МНК-оценки областей движения недостоверны для всех астероидов.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм определения степени нелинейности задачи НК и рассмотрены способы уменьшения нелинейности путем отбраковки наблюдений, выбора начального момента времени и исправления матриц ковариаций.

## ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАВИТИРУЮЩИХ ТЕЛ МЕТОДОМ СУПЕРПОЗИЦИИ ДИСКОВ

Теория потенциала широко применяется в небесной механике и астродинамике. Она активно разрабатывается и по сей день.

Дисковые модели — это интересный частный случай. Здесь проявляются некоторые особенности, неадекватные реальности, такие, как бесконечно большое значение пространственной плотности масс в диске, излом эквипотенциалей при переходе через диск, бесконечно большое значение круговой скорости в точках, где поверхностная плотность диска совершает скачок. Тем не менее эта модель представляет интерес. Так, круговая скорость некоторых дисков неплохо аппроксимирует кривую вращения достаточно плоских галактик. Выражения для вычисления потенциала кругового диска довольно просты. В случае когда не требуется очень высокой точности, вычисление потенциала может быть еще более упрощено. В последние годы дисковые модели используются в численных экспериментах по изучению стохастических орбит.

Метод суперпозиции, предложенный в настоящей работе, заключается в задании параметров парциальных дисков и вычислении общего потенциала как суммы парциальных потенциалов. В случае непрерывного распределения дисков по параметру общий потенциал берется интегрированием по этому параметру. Данный метод позволяет, сохраняя относительную простоту выражений для дисков, избавиться от недостатков, присущих плоским моделям.

В работе построено несколько простых моделей для проверки метода. Результаты, полученные для пробных моделей, согласуются с теорией. Метод показал себя вполне применимым.

**ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПОЛЯРА RXJ1846.9+5538**

В работе представлены и анализируются кривые блеска поляра RXJ1846.9+5538.

Поляр, или система типа AM Her, представляет собой тесную двойную систему, которая состоит из красного карлика и обладающего сильным магнитным полем белого карлика. Магнитное поле, достигающее десятков МГс, обуславливает отсутствие аккреционного диска, характерного для тесных двойных систем со слабым магнитным полем. Достоверно известно около 40 таких объектов. Чаще всего вещество с красного карлика аккрецирует на один из магнитных полюсов главного компонента — белого карлика. Исследуемая система представляет собой один из немногих случаев, когда струя аккрецирующего вещества ведет себя сложнее: происходит переключение аккреции с одного магнитного полюса белого карлика на другой, а в некоторые промежутки времени вещество падает на два полюса одновременно. В такие моменты система находится в ярком состоянии.

Для обработки использовано более 1600 наблюдений в фильтре R с экспозицией 180 с, полученных с помощью ПЗС-матрицы st7 на 38-см рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории, в том числе автором получено около 1000 наблюдений. Данные получены в период 29 мая — 27 июля 2005 г. Средняя точность одного наблюдения составляет 0.08 зв. величины. звездой сравнения служила звезда 1425.09302300 из каталога USNO A2.0, 15.6 зв. величины в фильтре R. Средний блеск системы 16.5 зв. величины, амплитуда его изменения — 2 зв. величины.

Фотометрический ряд был проанализирован на периодичность с помощью программы, основанной на методе Юркевича. Полученный период, составляющий 0.089381912 суток, в пятом знаке совпадает с тем, который получил Schwarz et al. (2002).

В период наших исследований поляр находился в ярком состоянии, о чем свидетельствует уровень среднего блеска, совпадающий с наблюдениями Schwarz et al. (2002), выполненными в 1995 г., и форма кривой блеска.

## ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ РУНГЕ—КУТТА 10-ГО ПОРЯДКА

Одной из задач теоретической астрономии является вычисление траекторий движения небесных тел. В данной работе решение уравнений движения мы искали с помощью численных методов Рунге—Кутта 10-го порядка. Для решения уравнений движения были программно реализованы методы 4-, 5- и 10-го порядков. В общем случае коэффициенты для метода десятого порядка находятся в виде решений последовательности линейных уравнений с матрицами типа Вандермонда и свободными параметрами. Мы независимо вычислили 85 коэффициентов для метода 10-го порядка. Контроль показывает, что количество значащих цифр не больше 16.

Для исследования точности метода Рунге—Кутта 10-го порядка, мы сравнили его решение с точным аналитическим решением задачи двух тел Солнце—Юпитер и Солнце—Меркурий. Для оценки погрешности интегрирования задачи N-тел мы применили метод Ричардсона. Полученная этим способом кривая характеризует рост локальной погрешности интегрирования. Сравнение кривых погрешности полученных с использованием аналитического метода и кривой, полученной методом Ричардсона, показывает, что рост кривых одинаков.

С целью иллюстрации применения этого метода в небесной механике мы проинтегрировали траекторию движения широкоизвестной кометы Шумейкера—Леви 9. В результате интегрирования орбиты до прохождения перигелия был получен момент наибольшего сближения 7 июля 1992 г. 18:36. Это на 3.5 ч раньше, чем в реальности. После первого тесного сближения интегрирование орбиты кометы без учета сжатия Юпитера и возмущений от его спутников невозможно. Исследование эволюции орбиты кометы в прошлом показывает, что после 1943 г. комета находилась на неизменной орбите, а до 1943 г. после сближения с Юпитером она перешла на более удаленную орбиту. Там она находилась примерно до 1800 г. Можно сделать вывод, что комета Шумейкера—Леви 9 принадлежала семейству комет Юпитера.

В. Ю. Конева<sup>1</sup>, С. Ю. Горда<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Уральский государственный университет,  
<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория УрГУ

## ПАРАМЕТРЫ ВИДИМОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОРБИТЫ ТРЕТЬЕГО ТЕЛА В СИСТЕМЕ SZ CAM

Используя новые значения моментов минимумов затменной переменной SZ Cam, полученные из фотометрических наблюдений, проводимых в Астрономической обсерватории Уральского университета на телескопе АЗТ-3 ( $D = 0.45\text{м}$ ) в период с 1997 по 2005 г., вкуче с данными из литературы, а также новые позиционные определения тесного спутника, отождествляемого с третьим телом, полученные по данным спеклинтерферометрических наблюдений SZ Cam, выполненных на 6-м телескопе САО РАН в 2002 г., мы определили полный набор параметров видимой относительной орбиты третьего тела. Результаты вычислений приведены в таблице.

Следует отметить близость значений углов наклона взаимной орбиты третьего тела и орбит компонентов затменной двойной SZ Cam  $i_{bin} = 74^\circ - 77^\circ$  [1], что говорит в пользу компланарности орбит и может свидетельствовать об общности происхождения всех компонентов этой кратной системы.

Параметры видимой относительной орбиты третьего тела

$P_{orb}$	$T_0$	$e$	$a$	$i$	$\Omega$	$\omega$
54 <sup>y</sup> .9	1980.437	0.84	0 <sup>''</sup> .043	72 <sup>°</sup> .1	303 <sup>°</sup> .6	20 <sup>°</sup> .5

## Список литературы

1. Lorenz R., Mayer P., Drechsel H. // A&A. 1998. Vol. 332. P. 909.

**ТОКОВЫЕ СЛОИ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
В МАГНИТОСФЕРАХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД**

Наблюдения показывают, что рентгеновская светимость маломассивных молодых звезд типа Т Тельца может достигать  $10^{30}$  эрг/с, что превышает среднюю рентгеновскую светимость Солнца в сотни раз. В данной работе исследуется гипотеза, что постоянное рентгеновское излучение маломассивных молодых звезд возникает в токовом слое на внутренней границе аккреционного диска. Предполагается, что магнитное поле звезды имеет дипольную компоненту, которая вблизи внутренней границы аккреционного диска направлена противоположно полю диска. В процессе аккреции поле диска постоянно наезжает на поле звезды, поэтому возникающий в месте их аннигиляции токовый слой (тонкая область с повышенной плотностью тока и диссипацией) никогда не исчезает. Из проведенных нами аналитических и численных расчетов следует, что для достижения наблюдаемой рентгеновской светимости при магнитном поле 100 Гс необходима концентрация заряженных частиц  $10^{11}–10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Данная работа проводилась по поручению Центра контроля космического пространства при Национальном космическом агентстве Украины.

Целью данной работы является сравнительная обработка наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ), полученных на разных наблюдательных станциях с использованием различных наблюдательных методик.

В работе использованы координатные наблюдения ИСЗ, полученные на трех наблюдательных станциях:

— Одесской астрономической обсерватории. Наблюдения велись на кинотеодолите «КТ-50». Координатная информация получена с электронных датчиков. Получено шесть ночей наблюдений (4 500 положений спутников);

— Николаевской астрономической обсерватории. Наблюдения велись на инструменте САК (скоростной автоматический комплекс). Координаты получены в результате первичной обработки наблюдательного материала методом Тернера. Всего проведено пять ночей наблюдений, получено около 200 положений спутников;

— квантово-оптической станции «САЖЕНЬ С» Национального космического агентства Украины. Координаты ИСЗ получены с электронных датчиков. Всего проведено 60 сеансов, получено в среднем по 10 000 положений спутников для каждого.

Автором выполнены наблюдения в Николаевской астрономической обсерватории и в Центре контроля космического пространства. Было написано программное обеспечение, позволяющее проводить обработку наблюдений, полученных на всех станциях. Предварительное вычисление элементов орбиты ИСЗ выполнено с использованием классического метода Лапласа с последующим уточнением методом дифференциальных поправок. Предварительным результатом работы является сравнение внутренней точности орбит, связывающей вечера наблюдений.

## **ФОТОМЕТР ИК-ДИАПАЗОНА ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Методика регистрации ИК-излучения от астрономических объектов существенно отличается от используемой в оптическом диапазоне. Причиной тому является прежде всего атмосферное пропускание, из-за которого наземные ИК-наблюдения возможны только в определенных спектральных окнах атмосферной прозрачности, и тепловой фон атмосферы и элементов конструкции телескопа и фотометра, мощность которого может превышать на несколько порядков сигнал от исследуемых источников. Для выделения слабого сигнала из мощного атмосферного и инструментального фона используется пространственная модуляция диаграммы направленности телескопа.

Другой особенностью ИК-измерений являются малые размеры приемника излучения (0.5–1 мм), поэтому требуется специальная оптическая система для построения входного зрачка телескопа на приемнике. Как правило используются сферические зеркала (полевые), которые не позволяют строить резкие изображения на приёмнике.

В работе в качестве полевого предложено использовать тороидальное зеркало, которое строит входной зрачок телескопа на приемнике без астигматизма.

Приводятся результаты измерений пороговой чувствительности ИК-фотометра на лабораторном стенде.

**Н. Ю. Никитина**

Казанский государственный университет

## **РАБОТА СТУДЕНТОВ-ГЕОДЕЗИСТОВ НА ОБЪЕКТАХ ГОРОДА КАЗАНИ**

В 2005 г. выпускником кафедры астрономии и геодезии Хакимуллинским Наилем Масхутовичем организована фирма, занимающаяся монолитным строительством сооружений различной сложности и имеющая свое геодезическое сопровождение. Фирма организована специально для трудоустройства студентов и прохождения ими практики во время учебы. Сотрудники фирмы преподают на кафедре свои дисциплины, и у них есть собственные запатентованные разработки, которым также обучаются студенты. Главной задачей является обеспечение точного соответствия положения возводимых конструкций, зданий, сооружений и технологического оборудования проекту. Для геодезического обеспечения строительства используются электронные тахеометры (Sokkia D510, Sokkia D530R, Trimble 3602, Topcon GPT-3005N, Leica TCR 407), цифровые (Trimble DiNi 12T) и оптические нивелиры с компенсатором (Nikon, Berger). Студенты работают на всех обслуживаемых объектах и выполняют следующие виды работ: вынос в натуру координат и осевых меток, исполнительные съемки и съемку в плане, нивелировку (высотные исполнительные), разбивочные работы, разметку осей, передачу высот на монтажные горизонты, наблюдения за деформациями зданий. У студентов имеется возможность карьерного роста, это зависит от их трудоспособности, профессиональных навыков и конечно же желания.

## СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ОРБИТ ПО СМЕШАННЫМ РЯДАМ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрен способ улучшения орбит небесных тел по наблюдениям разнородного состава: угловым и дальномерным. Данный способ позволяет легко сочетать использование в рамках одного алгоритма любых комбинаций угловых и дальномерных наблюдений небесных тел. Предлагаемый способ заключается в замене угловых и/или дальномерных наблюдений соответствующими прямоугольными координатами и в улучшении орбиты не по исходным наблюдениям, а по этим координатам. Улучшение орбиты производится обычным методом наименьших квадратов, т. е. из условия минимума

$$S = \sum_{i=1}^N \left[ (x_i^{(O)} - x_i^{(C)})^2 + (y_i^{(O)} - y_i^{(C)})^2 + (z_i^{(O)} - z_i^{(C)})^2 \right] \rightarrow \min,$$

где  $N$  — число наблюдений;  $x_i^{(C)}, y_i^{(C)}, z_i^{(C)}$  — вычисляемые прямоугольные координаты;  $x_i^{(O)}, y_i^{(O)}, z_i^{(O)}$  — «наблюдаемые» координаты, которые вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_i^{(O)} &= r_i^{(O)} \cos \delta_i^{(O)} \cos \alpha_i^{(O)}; \\ y_i^{(O)} &= r_i^{(O)} \cos \delta_i^{(O)} \sin \alpha_i^{(O)}; \\ z_i^{(O)} &= r_i^{(O)} \sin \delta_i^{(O)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $r_i^{(O)}, \alpha_i^{(O)}, \delta_i^{(O)}$  — наблюдаемые расстояние, прямое восхождение и склонение небесного тела. Суть способа заключается в том, что при отсутствии в составе наблюдения каких-либо компонент  $\alpha_i^{(O)}$  и/или  $\delta_i^{(O)}$  и/или  $r_i^{(O)}$  они заменяются в формуле (1) вычисленными значениями  $\alpha_i^{(C)}$  и/или  $\delta_i^{(C)}$  и/или  $r_i^{(C)}$  соответственно.

Тестирование способа производилось на модельном примере улучшения орбиты низколетающего ИСЗ. Численные эксперименты показали, что данный способ улучшения орбит имеет хорошую область сходимости, а при отсутствии моделируемых ошибок наблюдений дает точное решение, на основе которого моделировались наблюдения.

**А. А. Попов, И. Л. Бызов,  
В. В. Крушинский, И. С. Заложных**  
Уральский государственный университет

### **ТЕЛЕСКОП УЧЕБНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УРГУ**

Летом 2003 г. группа студентов приступила к восстановлению телескопа АВР-3 учебной обсерватории кафедры астрономии и геодезии. Нами была модернизирована старая немецкая монтировка АПШ, установлены шаговые приводы на обе оси. Для управления двигателями была разработана электронная схема, позволяющая осуществлять ведение телескопа с несколькими скоростями. Студенты самостоятельно изготовили комплект зеркал оптической системы Ричи—Кретьена с диаметром главного зеркала 265 мм, оправы главного и вторичного зеркал, легкую трубу, окулярный узел. Приемником излучения является цифровая зеркальная камера.

В ноябре этого года студенческий телескоп «ГОРЫНЫЧ» увидел первый свет. Телескоп в центре города задумывался как учебный инструмент. У студентов университета появилась возможность проведения наблюдений без отрыва от учебного процесса.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩИХ УЗЛОВ ДЖЕТОВ ИЗ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Проведено численное нелинейное моделирование процесса развития винтовых неустойчивых мод сверхзвуковых струйных выбросов (джетов) из молодых звезд в самосогласованной постановке задачи, учитывающей конусность струи, ее удержание давлением окружающей среды, наличие радиальных градиентов равновесных параметров газа, обусловленных ньютоновским гравитационным потенциалом звезды-источника, возможность охлаждения газа высвечиванием и его нагрева внешним излучением.

Проведенные нами серии численных экспериментов позволяют сделать выводы, перечисленные ниже.

- Наличие градиентов равновесных параметров газа струи и окружающей ее среды, обусловленных гравитационным полем центральной звезды-источника, приводит к тому, что на нелинейной стадии развития неустойчивые моды способны формировать винтовую структуру струи, не разрушая ее.

- Существует участок струи по радиальной координате, где амплитуда винтовых возмущений максимальна и убывает как с уменьшением, так и с увеличением радиуса.

- Независимо от временной частоты начальных возмущений через некоторое время формируется система волн с пространственной периодичностью, зависящей (для фиксированных равновесных параметров) только от азимутального номера моды — числа рукавов винтовой спирали по азимутальному углу (для  $m = 2$  это  $kr \sin \Theta_j \simeq 1.5 \div 2.9$  где  $k$  — радиальное волновое число возмущений;  $r$  — расстояние от источника выброса;  $\Theta_j$  — угол полураствора струи); однако с изменением частоты начальных возмущений изменяется радиальная протяженность области локализации таких возмущений.

- Нелинейная суперпозиция неустойчивых мод способна приводить к достаточно сложной морфологии наблюдаемых струй на некотором протяженном по радиусу их участке.

**СРАВНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАЛЛАКСОВ  
ЗВЕЗД КАТАЛОГА TYCHO-2 SPECTRAL TYPES  
С ДАННЫМИ КАТАЛОГА HIPPARCOS**

Успехи космической астрометрии привели в конце XX в. к созданию каталога Hipparcos, который содержит индивидуальные тригонометрические параллаксы для 118 тыс. звезд. Эти данные в сочетании с результатами наземных наблюдений позволили создать каталог Tycho-2 [1], который содержит уже 2.5 млн звезд, но не содержит информации о расстояниях до звезд. Важной задачей может считаться дополнение, хотя бы частично, каталога Tycho-2 данными о расстояниях. Появление каталога Tycho-2 Spectral Types [2] является серьезным стимулом для проведения такого рода работы. Наличие двумерной спектральной классификации звезд каталога Tycho-2 S. T. позволяет вычислить спектральные параллаксы звезд. Наличие общих звезд между каталогами Hipparcos и Tycho-2 S. T. позволяет изучить различия в оценках расстояний тригонометрическим и спектральными способами.

Основной результат работы — каталог общих звезд, для которых приводятся расстояния, вычисленные разными способами. Особый интерес представляют звезды с большими различиями между тригонометрическим расстоянием и расстоянием, вычисленным на основе спектрального параллакса. Удалось выяснить, что основная причина значительных отклонений связана с ошибками в определении класса светимости звезды и с аномальными значениями показателя цвета  $B - V$  для ряда звезд. Данная работа поможет внести исправления в спектральную классификацию общих звезд Hipparcos и Tycho-2 S. T.

**Список литературы**

1. *E. Høg et al.* The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars // *Astron. Astrophys.* 2000. Vol. 355. L27.
2. *Wright C. O., Egan M. P., Kraemer K. E. et al.* The Tycho-2 Spectral Type Catalog // *Astron. J.* 2003. Vol. 125. P. 359.

К. В. Соколовский<sup>1</sup>, С. Л. Назаров<sup>2</sup>,  
А. А. Лебедев<sup>1</sup>, Д. С. Насонов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ГАИШ МГУ, <sup>2</sup>ВМиК МГУ

## ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ПЕРЕМЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА СЕРИИ ПЗС СНИМКОВ

Важной задачей наблюдательной астрономии является максимально полное использование полученных данных. В частности, при получении серии прямых снимков одной области неба обычно используется информация только о нескольких объектах видимых на снимке: например, о переменной звезде и звездах сравнения. При этом информация о других попавших на снимок объектах остается неостребованной. Чтобы получить удобное средство ее извлечения нами была начата разработка программного пакета VAST.

VAST [VARIABLE Star Tool kit] предназначен для обнаружения переменных объектов на сериях fits-изображений. Он использует SExtractor [1] для обнаружения и фотометрии звезд на заданных изображениях и производит их отождествление с видимыми на первом (опорном) кадре. В результате для каждого объекта на опорном кадре строится кривая блеска в инструментальной системе звездных величин. Анализируя кривые блеска методом, предложенным в работе [2], отбираются переменные объекты. Окончательный вывод об обнаружении переменности блеска данного объекта делается после визуальной инспекции полученной кривой блеска.

VAST написан на языке Си для работы в ОС GNU/Linux. Подробное описание программы и ее последняя версия доступны по адресу: <http://saistud.sai.msu.ru/poisk>

### Список литературы

1. *Bertin E.* SExtractor v2.3 User's manual. Institut d'Astrophysique & Observatoire de Paris. <http://terapix.iap.fr/IMG/pdf/sextactor.pdf>
2. *Welch D., Stetson P.* // Astron. J. 1993. Vol. 105. P. 1813.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ЗВЕЗД В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА**

Проведено статистическое исследование кинематики звезд окрестности Солнца радиусом 200 пк. Для работы использовались данные о положениях и скоростях звезд из каталога, составленного Г. А. Гончаровым (ГАО РАН).

Параметры эллипсоида скоростей (моменты первого и второго порядков) находились путем экстраполяции к нулевому гелиоцентрическому расстоянию методом наименьших квадратов по концентрическим шарам с равномерно убывающим радиусом. Получились следующие результаты: компоненты скорости Солнца относительно местного центроида  $u_{\odot} = 8.6$ ,  $v_{\odot} = 20.4$ ,  $w_{\odot} = 7.8$  (км/с); дисперсии скоростей  $D_u = 1250$ ,  $D_v = 800$ ,  $D_w = 300$  (км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>).

Для определения галактоцентрической скорости Солнца, кроме описанной выше экстраполяции, проводилась экстраполяция к нулевому угловому моменту  $L = V(\theta)R$  (в полярных галактоцентрических координатах) по отношению к некоторой неподвижной точке Галактики. Удалось определить компоненту скорости  $V_g = V(\theta = 0) = (230 \div 245)$  км/с в зависимости от выбора значения расстояния до центра Галактики  $R_0 = (8.0 \div 7.5)$  кпк соответственно. Примерно такой же результат получился и при замене порядка экстраполирования, что может говорить о корректности полученной оценки. Компоненты  $U_g$  и  $W_g$  скорости Солнца определить не удалось, поскольку «точка» с  $L = 0$  оказалась подвижной по радиусу Галактики и по  $z$ .

Д. В. Стеценко  
Казанский государственный университет

## НАПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Реализован пакет программ для астрометрической обработки снимков 1.5-метрового телескопа РТТ150 на языках программирования Pascal, C, Delphi. Программный пакет был протестирован путем определения координат одного из рентгеновских источников, снимки которого были получены в августе 2005 г. на РТТ150. Сравнение координат РТТ150 с координатами этого же объекта из каталога USNO-B1.0 показало соответствие в пределах 0.02–0.05 угловых секунд, что является предельной точностью для классических методов наземной астрометрии. Также было выполнено определение координат Плутона по снимкам РТТ150, полученным в период с апреля по август 2005 г. По координате  $\alpha$  разность (O–C) составила 0.05 угловых секунды, а по координате  $\delta$  — +0.3 угловых секунды, что в 6 раз превышает точность определения координат. Полученная невязка по координате Delta является систематической и причина ее, видимо, связана с неточностью расчета эфемериды для Плутона (по данным Интернета с использованием теории DE405/LE405) и должна быть исследована отдельно.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СИММЕТРИЧЕСКИХ ИНТЕГРАТОРОВ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АСТЕРОИДНОЙ ДИНАМИКИ**

В работе исследуются возможности симметрических методов в задачах моделирования астероидного движения. Рассмотрены два явных метода 8-го порядка: одношаговый метод Дормана—Принца [1] (типа Рунге—Кутты) и многошаговый симметрический метод Куинлэна—Тримейна [2]. Проведен сравнительный анализ эффективности численных методов на примере астероидов Алинды, Церера и Икар, а также гипотетических астероидов, находящихся в резонансе с Юпитером. Моделирование астероидного движения выполнялось на интервале 1000 оборотов объектов.

Полученные результаты, в частности, показали, что для астероидов Церера и Икар при одном и том же быстродействии симметрический интегратор дает точность представления орбитального движения выше на несколько порядков, нежели интегратор Дормана—Принца. С другой стороны, при сохранении заданной точности он позволяет интегрировать орбиту быстрее в 5—10 раз. В то же время в резонансных случаях для Алинды и гипотетических астероидов применение симметрической схемы интегрирования оказывается неэффективным.

**Список литературы**

1. *Hairer E., Nersett S. P., Wanner G.* Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problem. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; N.Y., L., P., Tokyo, 1987.
2. *Quinlan G. D., Tremaine S.* Symmetric Multistep Methods for the Numerical Integration of Planetary Orbits // *Astron. J.* 1990. Vol. 100. I. 5. P. 1694.

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ СИЛ  
НА ДИНАМИКУ ФРАГМЕНТОВ  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

В работе численно исследуется механизм очищения околоземной орбиты от мелкой фракции космического мусора за счет влияния сил светового давления и эффекта Пойнтинга—Робертсона [1].

Экспериментально показано, что главным фактором очищения околоземного пространства является световое давление. Однако под его влиянием на Землю выпадают только те частицы, для которых произведение их плотности и размера  $\rho d$  меньше порядка  $0.02 \text{ кг/м}^2$ .

Для фракции частиц с большими размерами и плотностями к уменьшению орбитальных высот приводит влияние эффекта Пойнтинга—Робертсона, главным образом за счет диссипации. Однако это влияние настолько мало, что эффект Пойнтинга—Робертсона приводит к выпадению частиц только за интервалы времени порядка тысячи лет и более, поэтому в прикладных задачах этот фактор можно не принимать во внимание.

В работе также исследуется влияние формы частицы и частоты ее вращения на возмущения от радиационных сил.

**Список литературы**

1. *Burns J., Lamy P., Soter S.* Radiation Forces on Small Particles in the Solar System // *Icarus*. 1979. Vol. 40. P. 1.

## УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРИ УЛУЧШЕНИИ ОРБИТ

Рассматривается применение упрощенного способа задания начального приближения при улучшении орбит небесных тел, не использующего каких-либо методов определения предварительной орбиты. Методы определения предварительной орбиты предназначены для получения довольно точного начального приближения; часто такая точность избыточна. Предлагаемый способ практически не требует затрат на программирование и является модификацией способа [1]. Способ заключается в приближенном определении векторов положения и скорости по двум близким наблюдениям. Обозначим номера этих наблюдений  $i$  и  $i + 1$ . Сначала вычисляются векторы положения  $\vec{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$  и  $\vec{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$  по формулам

$$\begin{aligned} x_1 &= d \cos \delta_i \cos \alpha_i; & x_2 &= d \cos \delta_{i+1} \cos \alpha_{i+1}; \\ y_1 &= d \cos \delta_i \sin \alpha_i; & y_2 &= d \cos \delta_{i+1} \sin \alpha_{i+1}; \\ z_1 &= d \sin \delta_i; & z_2 &= d \sin \delta_{i+1}, \end{aligned}$$

где  $d$  – геоцентрическое расстояние объекта – задается приблизительно из сторонних предположений. Вектор скорости вычисляется по формуле  $\vec{v} = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)/(t_{i+1} - t_i)$ , где  $t_i$  и  $t_{i+1}$  – моменты  $i$ -го и  $i + 1$ -го наблюдений. В качестве начального приближения для улучшения орбиты используется вектор  $\vec{q} = (x_1, y_1, z_1, \vec{v}) + \vec{g}$ , где  $\vec{g}$  – гелиоцентрический вектор положения и скорости Земли.

Данный способ был применен при улучшении орбит короткопериодических комет и астероидов, при этом для каждого случая варьировалось значение  $d$  от 1 до 10 а. е. Во всех случаях процесс улучшения орбиты сходиллся.

### Список литературы

1. Батурин А. П. Сходимость метода множителей Лагранжа при улучшении орбит // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Докл. конф. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. С. 337–338.

**РАДИАЦИОННЫЙ ВЫНОС ПЫЛИ  
ИЗ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК  
ПРИ БОЛЬШИХ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ**

В иерархической теории происхождения структуры во Вселенной первые гравитационно-связанные объекты — гало темной материи, внутри которых возможно рождение звезд, появляются на красных смещениях  $z \sim 20$  и имеют массы  $M \sim 10^7 M_{\odot}$ , включая темную и барионную компоненты. Современные наблюдения уверенно демонстрируют присутствие тяжелых элементов в межгалактическом газе уже на красных смещениях  $z \sim 6$  с распространенностями, слабо зависящими от красного смещения в интервале  $z = 2-6$ . Динамические процессы, обеспечивающие вынос металлов из ранних галактик, т. е. гало темной материи и перемешивание их на больших масштабах в межгалактической среде, остаются неизученными. Одна из возможностей связывается с выносом пыли, аккумулировавшей в себе какую-то часть тяжелых элементов, произведенных в гало, радиационным давлением звездного излучения.

Аспекты динамики радиационного выноса пылевых частиц из темных гало на «микроскопических» масштабах, т. е. на масштабах внутри гало и в их ближайшей окрестности, далеко не тривиальны: способность излучения первых звезд выметать пыль из гало зависит от таких факторов, как распределение газа в гало, скорости звездообразования и потока ультрафиолетового излучения, распределения суммарного гравитационного потенциала, возможного присутствия уже в ранних галактиках ненулевого магнитного поля. Поэтому вопрос о возможности обогащения межгалактической среды ранней Вселенной,  $z \sim 6$ , металлами посредством радиационного выброса из ранних галактик пыли и последующего разрушения пылевых частиц требует детального анализа динамики пыли внутри темных гало и в непосредственной близости от них.

Мы описываем особенности такой динамики в зависимости от характеристик собственно самих гало темной материи и их барионной составляющей.

**В. Ш. Шайдулин**

Уральский государственный университет

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ  
ОБЪЕКТА С ЧАСТИЦАМИ ОБЛАКА МУСОРА  
В ОБЛАСТИ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТ  
ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА**

Активное освоение космоса человеком не проходит бесследно. Сегодня в околоземном пространстве наблюдается множество объектов: активные и отслужившие спутники, верхние ступени ракет и частицы мусора, образовавшиеся в результате различных коллизий, случившихся с крупными объектами. Данная работа — эта попытка оценить опасность, которую представляет собой множество частиц мусора для активных объектов. Для этого используются результаты ранее проработанной теоретической модели образования и формирования облака частиц, образовавшегося в результате отдельно взятого критического события — самопроизвольного взрыва объекта. В докладе освещаются результаты проработки различных алгоритмов оценки вероятности столкновения некоего фиктивного объекта с частицами мусора.

О. В. Шелемей<sup>1</sup>, М. С. Кирсанова<sup>1</sup>,  
А. М. Поляков<sup>1</sup>, Н. В. Панкратова<sup>1</sup>,  
А. М. Соболев<sup>1</sup>, А. П. Цивилев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет, <sup>2</sup>ПРАО ФИАН

## НАБЛЮДЕНИЯ ЛИНИЙ NH<sub>3</sub> В ОБЛАСТЯХ МАССИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ РУКАВА ПЕРСЕЯ НА 22-М ТЕЛЕСКОПЕ ПРАО ФИАН

Наблюдения спектральных линий молекул в направлении на области звездообразования дают информацию о физических условиях в этих областях. Наблюдения в направлении определенного спирального рукава могут выявить наличие особенностей процесса образования массивных звезд, присущих данной области Галактики.

В июле—августе 2005 г. на 22-метровом телескопе ПРАО ФИАН были проведены наблюдения наиболее ярких линий аммиака с частотами, близкими к 23 ГГц. Излучение аммиака трассирует области плотного газа. Наблюдения велись в направлении 15 областей массивного звездообразования рукава Персея, содержащих метанольные мазеры. Спиральный рукав Персея является внешней по отношению к Солнцу частью Галактики. Наличие метанольных мазеров в этих областях говорит о том, что они находятся на ранних стадиях процесса звездообразования. Излучение аммиака зарегистрировано в 7 источниках: G85.40-0.00, G108.75-0.96, G111.54-0.78, G123.06-6.3, G133.72+1.2, G173.69+2.9, G183.35-0.6. В источниках G85.40-0.00, G173.69+2.9 и G183.35-0.6 излучение аммиака обнаружено впервые. Порог чувствительности наблюдений составлял 0.05 К, спектральное разрешение — 0.31 км/с.

По результатам наблюдений определены лучевые скорости, яркости и ширины линий. Во вновь обнаруженных источниках ширины линий лежат в пределах 1.23—1.5 км/с, яркости — от 0.11 до 0.27 К. Определены различия между лучевыми скоростями линий аммиака и пиками мазерного излучения метанола. Среднее значение этого различия равно 4.1 км/с.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (раздел № 3.3, проект 65624).

---

© О. В. Шелемей, М. С. Кирсанова, А. М. Поляков, Н. В. Панкратова,  
А. М. Соболев, А. П. Цивилев, 2006

# Тезисы кратких сообщений

Е. А. Аввакумова

Уральский государственный университет

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СИНТЕЗА КРИВЫХ БЛЕСКА МАССИВНЫХ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Кривые изменения блеска контактных массивных тесных двойных систем (ТДС) ранних спектральных классов характеризуются наличием разнообразных локальных флуктуаций светимости. Эти особенности традиционно связывают с наличием около данных систем общих околозвездных оболочек, образующихся вследствие мощного звездного ветра и процесса перетекания вещества с одного компонента на другой. Анализ кривых блеска таких двойных систем проводят методами синтеза теоретических кривых блеска в модели двух звезд, ограниченных эквипотенциальными поверхностями. Однако данная модель не включает в себя учет особенностей кривых изменения блеска.

Данная работа посвящена детальному исследованию результатов синтеза кривых изменения блеска трех массивных ТДС: LY Возничего, ВН Центавра и SV Центавра. Для проведения анализа у каждой двойной системы были найдены остаточные отклонения теоретических кривых изменения блеска от наблюдений. Зависимость остаточных отклонений от фазы орбитального периода указывает на расположение газовых структур около компонентов двойной системы. Зависимость остаточных отклонений от спектрального интервала наблюдений помогает выделять процессы, происходящие в окрестностях двойной системы и не связанные с рассеянием на свободных электронах. Для каждой звезды проведен корреляционный анализ между остаточными отклонениями в разных спектральных диапазонах, который показал наличие линейных зависимостей. Кроме того, корреляционный анализ между остаточными отклонениями разных звезд также указывает на существование линейных связей. Эти функциональные зависимости между остаточными отклонениями могут указывать на общие процессы в окрестностях систем данного типа.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

В данной работе представлены результаты по исследованию областей возможных движений спутниковой системы Юпитера на примере конкретных объектов: близких спутников (JXV Адрастея, JXVI Метис, JV Амальтея, JXIV Теба), далеких спутников группы Гималии (JXIII Леда, JVI Гималия, JX Лисифея, JVII Элара) и группы Пасифе (JXII Ананке, JXI Карме, JVIII Пасифе, JIX Синопе).

Начальные области возможных движений моделировались в фазовом пространстве координат и скоростей в рамках известного метода наименьших квадратов (МНК). Динамика вероятностных областей оценивалась на интервалах времени порядка 100 лет и более.

Проведено сравнение приближенной оценки  $|\Delta\mathbf{x}|$  размера вероятностной области по формуле  $|\Delta\mathbf{x}| \sim 3n\Delta a\Delta t$  с нелинейной оценкой. Здесь в качестве  $\Delta a$  выбирается максимальное отклонение вероятностного значения большой полуоси от ее МНК-оценки на начальный момент времени  $t_0$ ,  $n$  — среднее движение спутника, а  $\Delta t = t - t_0$ . Для большинства объектов оба способа оценивания дают хорошо согласующиеся результаты.

В целом результаты исследования показали, что численные модели для далеких спутников, построенные по всем наблюдениям с момента их открытия, достаточно достоверно представляют движение спутников на длительных интервалах времени и могут быть использованы для задач идентификации.

В то же время для близких спутников Амальтеи и Тебы интервалы достоверности гораздо меньше и сопоставимы с интервалами, охватывающими их наблюдения. Для спутников Адрастеи и Метиса области возможных движений оказываются очень большими, что делает их динамические модели непригодными для задач прогноза. Отчасти такие результаты для близких спутников обусловлены использованием немногочисленных наблюдений, покрывающих малые интервалы времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-17043).

**СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ МЗС  
С УЧЕТОМ ГАЗОПЫЛЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Построена стохастическая модель химической эволюции межзвездного облака, впервые учитывающая как химические реакции в газовой фазе, так и процессы аккреции/десорбции и реакции на поверхности пылевых частиц. Модель включает в себя все 3864 реакции в газовой фазе из базы данных UMIST 95 [1] и 191 поверхностную реакцию из работы [2].

Расчет модели проведен для случая темного облака ( $T=10$  К,  $n_H = 2 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>, поле ультрафиолетового излучения отсутствует). Разработанный нами ускоренный метод стохастического моделирования позволил провести расчет эволюции облака на промежутке  $10^6$  лет на компьютере класса Pentium 4 Prescott 3 ГГц за машинное время порядка 48 ч. Полученные результаты показывают, что учет стохастического характера химических процессов приводит к значительным отличиям от результатов расчетов в приближении детерминистического подхода.

Расчетный код протестирован путем расчета описанной выше модели без включения поверхностных реакций. В этом случае наблюдается полное совпадение результатов расчетов классическим и стохастическим методами.

**Список литературы**

1. Millar T. J., Farquhar P. R. A., Willacy K. The UMIST Database for Astrochemistry 1995 // A&AS 1997. Vol. 121 P. 139.
2. Hasegawa T. I., Herbst E., Leung C. M. Models of gas-grain chemistry in dense interstellar clouds with complex organic molecules // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1992. Vol. 82 P. 167.
3. Васюнин А. И., Шематович В. И. Стохастические методы моделирования химии межзвездной среды // Физика Космоса: Тр. 34-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. —1 февр. 2002 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005, С. 246.

В. Г. Грачев, К. А. Иванов, Э. Н. Турлов  
Институт астрономии РАН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА СТАНДАРТИЗАЦИИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ

В настоящее время используемые регистраторы оптического излучения на базе ПЗС матриц вносят ряд искажений, таких, как темновой ток, неоднородность распределения сигнала по полю приемника и т. д. В связи с этим возникла необходимость провести исследования статистических характеристик шумов, вносимых оптико-электронным комплексом.

В докладе приведены результаты исследований показателей эффективности метода стандартизации фотометрических измерений. Основная масса статистики набрана на высокочувствительной телевизионной камере типа SIM-ICCD-05, дополнительные измерения, подтверждающие результаты исследований, получены на камерах Watec LCL-902K.

Получен ряд критериев, которые необходимо учитывать при обработке фотометрических реализаций космических объектов, полученных с использованием камеры SIM-ICCD-05.

Г. Н. Дремова<sup>1</sup>, М. А. Свечников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ,

<sup>2</sup>Уральский государственный университет

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ «ТОЧНЫХ»  
И «ПРИБЛИЖЕННЫХ» МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
РАЗДЕЛЕННЫХ И ПРЕДКОНТАКТНЫХ  
ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ**

В данной работе для тесных двойных систем (ТДС) с разделенными и предконтактными компонентами проводится поэлементное сравнение звездных характеристик — светимостей, спектров, масс, абсолютных и относительных радиусов компонентов, их отношений масс, орбитальных периодов, больших полуосей и наклонов орбит. Элементы орбиты, определенные из решений известных фотометрических кривых блеска и известных (в большинстве случаев) кривых лучевых скоростей, условно называются «точными». Элементы спектроскопической и фотометрической орбит, полученные с использованием приближенных статистических соотношений, получили название «приближенные».

Правомерно возникает вопрос: насколько отличаются «точно» и «приближенно» определенные элементы орбиты для затменно-двойных систем с разделенными и предконтактными компонентами?

Анализируя критерии согласия по каждой паре сравниваемых элементов — дисперсию отдельного результата  $\sigma$  и дисперсию среднего результата  $\epsilon$  — было найдено, что:

- $2 \div 3$  % систем имеют элементы орбиты, оцененные с грубой ошибкой, в 3 раза и более;
- $5 \div 8$  % систем показывают отличия вычисленных элементов орбиты от «истинных» элементов в  $1.5 \div 2$  раза;
- $\sim 90$  % систем имеют элементы орбиты, довольно близкие (в пределах точности 20 %) к элементам, полученным более точными методами.

П. В. Кайгородов, Д. В. Бисикало, Д. А. Кононов  
Институт астрономии РАН

## О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Ве/Х ЗВЕЗД

Предлагается новый механизм генерации рентгеновского излучения в двойных Ве/Х звездах. В рамках самосогласованной модели расширяющейся оболочки оптической компоненты Ве/Х звезды показано, что темп массообмена через окрестность внутренней точки Лагранжа  $L_1$  достаточен для генерации наблюдаемой рентгеновской светимости Ве/Х звезд. По результатам расчетов обнаружена зависимость между орбитальным периодом Ве/Х звезд и величиной наблюдаемого рентгеновского потока. Сравнение с наблюдениями подтвердило наличие эффекта уменьшения рентгеновского потока с увеличением орбитального периода.

Зависимость рентгеновской светимости  $L_x$  от орбитального периода для 30 известных Ве/Х звезд (кружки) и расчетные величины  $L_x$  для трех численных расчетов (звездочки), пунктирной линией показана аппроксимация зависимости для наблюдаемых Ве/Х звезд

А. П. Карташова<sup>1</sup>, Ю. М. Горбанев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН,

<sup>2</sup>Астрономическая обсерватория ОНУ

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Для анализа степени опасности пересечения орбит пылевых частиц метеорных роев с геостационарной орбитой требуются регулярные патрульные наблюдения метеорных явлений с применением телевизионного метода регистрации.

На Звенигородской обсерватории ИНАСАН в 2005 г. была проведена серия телевизионных наблюдений метеорных потоков.

Для наблюдений использовалась система на базе ЛД-3, средством регистрации объектов служила высокочувствительная камера SIM ICDD-05 со специальным объективом. Объектив с трансфокатором, который позволяет изменять поле зрения от единиц угловых минут до градусов.

В результате наблюдений было получено несколько часов наблюдательного материала.

Последующая обработка материалов осуществлялась с привлечением специалистов Одесской астрономической обсерватории.

В результате обработки кадров были получены координаты метеоров. Внешняя точность была определена по контрольным звездам, которая составляет чуть меньше 2 мин дуги. Были оценены звездные величины наблюдаемых объектов.

М. С. Кирсанова<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>3</sup>,  
Л. Е. Johansson<sup>2</sup>, М. Thomasson<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, <sup>2</sup>Onsala Space Observatory,  
<sup>3</sup>Уральский государственный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ МАССИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В СПИРАЛЬНОМ РУКАВЕ ПЕРСЕЯ

Вопрос о химико-динамических эффектах, возникающих при воздействии галактических спиральных волн на молекулярные, облака практически не изучен. Одним из таких эффектов является относительное движение частей облака, имеющих различную плотность и трассируемых разными молекулами. Этот эффект может быть заметен в изолированных областях массивного звездообразования, имеющих плотное ядро и менее плотную оболочку.

В декабре 2005 г. на 20-м телескопе в Онсала (Швеция) проведены наблюдения 16 зон массивного звездообразования в молекулярных радиолиниях CS(2-1) и <sup>13</sup>CO(1-0), трассирующих плотный и менее плотный газ соответственно. Были выбраны объекты из рукава Персея. Источники находятся на ранней стадии процесса звездообразования, поскольку содержат мазеры метанола. Построены 9-точечные карты 14 объектов и найдены пики излучения CS(2-1) и <sup>13</sup>CO(1-0) в них. Излучение в этих линиях для ряда объектов зарегистрировано впервые. В большинстве источников пики излучения CS(2-1) и <sup>13</sup>CO(1-0) совпадают. Показано, что G85.40-0.00, IRAS 22142+5206, G111.24-0.7 и G183.35-0.5 являются компактными в линии излучения CS(2-1). Анализ профилей линий CS(2-1) и <sup>13</sup>CO(1-0) в направлении на пики излучения показал, что отличие скоростей спектральных максимумов  $|V_{^{13}CO} - V_{CS}|$  в каждом из объектов всегда меньше ширин линий CS(2-1) и <sup>13</sup>CO(1-0). Средние значения приведенных величин — 0.43, 3.44 и 3.13 км/с соответственно.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (раздел № 3.3, проект 65624). М. С. Кирсанова благодарит также программу Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии».

---

© М. С. Кирсанова, А. М. Соболев, Л. Е. Johansson, М. Thomasson, 2006

В. Г. Клочкова<sup>1</sup>, В. Е. Панчук<sup>1,2</sup>, Е. Л. Ченцов<sup>1</sup>,  
М. В. Юшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН,

<sup>2</sup>Ставропольский государственный университет

## К ПРОБЛЕМЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО СТАТУСА QYSGE

Желтый сверхгигант QY Sge ( $Sp = G0e$ ) — оптический компонент источника IRAS 20056+1834, расположен вне плоскости Галактики:  $b = -7.46^\circ$ . Поляризационные наблюдения с телескопом UKIRT в полосах  $J$  и  $H$  не выявили какой-либо протяженной структуры или отклонений от симметрии на уровне  $FWHM = 0.67''$ . Авторы отнесли IRAS 20056+1834 к группе PPN с хорошо выраженным ядром и очень компактной оптически толстой оболочкой («core-dominated object»). Поляризация постоянна по всему изображению объекта, но значительно уменьшается с ростом длины волны:  $P_J = 14\%$ ,  $P_H = 7\%$ . Пока нет однозначного ответа о физическом механизме, который поляризует излучение IRAS 20056+1834 в отсутствие протяженной оболочки.

Отсутствие протяженной структуры туманности подтверждается и наблюдениями объекта на 15-м телескопе Максвелла (JCMT) в суб-миллиметровом диапазоне. В связи с этим авторы пришли к выводу о том, что QY Sge находится в самом начале формирования оболочки. С этим выводом согласуется и высокая температура ( $T_e \approx 600$  К) околозвездной пыли.

В настоящее время нет согласия в определении статуса QY Sge (массивный сверхгигант, звезда типа RV Тау или R CrB, спектрально-двойная), в оценке расстояния (имеющиеся данные различаются на порядок), а также в понимании всех особенностей ее оптического спектра. Поэтому мы предприняли на 6-м телескопе спектральный мониторинг QY Sge с высоким спектральным разрешением и в данной работе представляем результаты первых 6 лет наблюдений.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект номер 05-07-90087-в) и грантом Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (проект номер МК-874.2004.2).

А. В. Кожевникова<sup>1</sup>, И. Ю. Алексеев<sup>2</sup>,  
М. А. Свечников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория УрГУ,  
<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория

## ОСОБЕННОСТИ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ ИЗБРАННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

Проведены многоцветные фотометрические наблюдения 8 активных двойных систем типа RS CVn и BY Dra (CG Cyg, BH Vir, WY Snc, IN Com, IL Com, UX Ari, V711 Tau и CM Dra), обладающих активностью, аналогичной солнечной. Наблюдения проводились в АО УрГУ на 70-см телескопе и многоканальном фотометре, а также в КрАО на 1.25-м АЗТ-11 и фотометре-поляриметре начиная с 2002 г. (всего 128 ночей, общая продолжительность 362 ч). На кривых блеска всех звезд была обнаружена вызванная пятнами возмущающая волна с амплитудами переменности  $V$  от  $0.02^m$  (CM Dra) до  $0.10^m$  (CG Cyg и V711 Tau). Для системы CG Cyg удалось пронаблюдать быстрое изменение возмущающей волны в течение месяца по амплитуде и по фазе, связанное, вероятно, с переключением активных долгот и существенными изменениями конфигурации пятен на поверхности компонент системы.

Проведено моделирование запятненности программных двойных систем по разработанной в КрАО зональной модели. Определены разности температур пятна и окружающей фотосферы, площадь запятненности, диапазон изменения широт пятен. Пятна располагаются в основном на средних широтах, максимальные площади запятненных областей составляют значительную долю полной поверхности звезды (до 50 %) и показывают тенденцию роста с уменьшением периода осевого вращения звезды. Разность температур между спокойной фотосферой и пятнами составляет от 600 до 2200 К. Получены зависимости параметров звездных пятен от спектрального класса звезд: температуры пятен и их широты увеличиваются к более горячим звездам. Обнаружены аналоги солнечной диаграммы бабочек Маундера для 4 систем (CG Cyg, IN Com, WY Snc и V711 Tau), отмечено наличие двух активных долгот для большинства систем. Проведено уточнение фотометрических и абсолютных элементов орбит 3 затменных систем: CG Cyg, CM Dra и WY Snc.

**ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
НЕИЗОТЕРМИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ УРАНА  
ПО ДАННЫМ ОБ ИНТЕНСИВНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Используя разработанный А. В. Мороженком [1] метод определения оптических параметров атмосфер планет-гигантов по данным об интенсивностях деталей комбинационного рассеяния в спектрах этих планет по наблюдательным данным Каркошка [2] определил спектральные значения отношений  $\tau_a/\tau_R$ ,  $\tau_\kappa/\tau_R$ ,  $\tau_\kappa/\tau_S$ , а также альбедо однократного рассеяния аэрозольной части  $\omega$  (здесь  $\tau_a$ ,  $\tau_R$ ,  $\tau_\kappa$  и  $\tau_S = \tau_a + \tau_R$  — аэрозольная, газовая и поглощающая составляющие эффективной оптической глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения). При этом по методике, которая была разработана в работе Мороженко, Костокрыз [3], учитывалось изменение коэффициентов рамановского рассеяния. Эти коэффициенты обусловлены вращательными переходами  $j = 0, 1, 2$  за счет изменения количества водорода в орто- и пара-состояниях в условиях реального температурного профиля в атмосфере Урана [4].

**Список литературы**

1. *Мороженко А. В.* Комбинационное рассеяние в атмосферах планет-гигантов и оптические свойства атмосферного аэрозоля // Кинематика и физика небесных тел. 1997. Т. 13, вып. 4. С. 22.
2. *Karkoshka E.* Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm wavelength: The Methane Spectrum. *Icarus* 111. 1994. P. 174–192.
3. *Мороженко А. В., Костокрыз Н. М.* Особенности формирования деталей комбинационного рассеяния в неизотермической атмосфере // Кинематика и физика небесных тел. 2005. Т. 21, вып. 2. С. 114.
4. *Lindal G. F.* The atmosphere of Neptune: An analysis of radio occultation data acquired with Voyager 2 // *Astron. J.* 1992. Vol. 103. № 3. P. 967–982.

## МОДЕЛЬ ХИМИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Разработана численная модель химико-динамической эволюции галактик на основе однозонной модели Вибе, Тутукова и Шустова [1]. Численной базой для модели послужил программный код GADGET-2 [2]. Модель позволяет проследивать историю звездообразования и химического обогащения газа начиная с самых ранних стадий эволюции галактик, с учетом обмена энергией и импульсом между газовым и звездным компонентами галактики, влияния темного вещества и космологического расширения.

### Список литературы

1. Вибе Д. З., Тутуков А. В., Шустов Б. М. Об эволюции темпа звездообразования в дисковых галактиках // *Астроном. журн.* 1998. Т. 75, вып. 1. С. 3.
2. Springel V. The cosmological simulation code GADGET-2 // *MNRAS* 2005. Vol. 364. P. 1105.

## АРХЕОАСТРОНОМИЯ: ПРОБЛЕМЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

Археoaстрономия как научное направление важна для определения этапов развития астрономических знаний, а также для уточнения возраста древних культур, последовательности палеоклиматических колебаний, разгадки тайн древних мифов.

В России для археoaстрономии предложено следующее определение: «Археoaстрономия — это отрасль науки, формирующаяся на стыке гуманитарного и естественно-научного знания, предметом исследования которой являются памятники прошлых эпох, исследуемые историческими (прежде всего археологическими), астрономическими и иными методами с целью как воссоздания астрономических представлений древних — с учетом фактора эволюции природной среды, так и для проверки современных астрономических гипотез» [1].

Зарождение археoaстрономии началось более тридцати лет назад с появлением работ британского астронома Дж. Хокинса, посвященных астрономическому содержанию Стоунхенджа.

На данном этапе развития археoaстрономия сталкивается со следующими проблемами: не до конца разработаны методы археoaстрономии; существует необходимость объединить различные материальные и исторические свидетельства для наиболее адекватного понимания прошлого; недостаточное количество данных о Земле на время строительства древних сооружений (движение земной оси, дрейф материков); междисциплинарные разночтения.

Тем не менее археoaстрономия быстро развивается. Выпускаются периодические журналы посвященные археoaстрономии, проводятся ежегодные конференции.

### Список литературы

1. Астрономия древних обществ: Материалы конф. «Астрономия древних цивилизаций»: Москва, 23–27 мая 2000 г./ Отв. ред. Т. М. Потемкина, В. Н. Обридко. М.: Наука, 2002.

**СТРУКТУРА ОБЛАКА ЧАСТИЦ,  
ОБРАЗОВАННОГО ВЗРЫВОМ НА ОРБИТЕ**

Рассматривается модельная задача взрыва на орбите. Объект  $O_1$  нулевой массы движется вокруг центрального массивного тела  $O$  в экваториальной плоскости по круговой орбите со скоростью  $w$ . В момент взрыва происходит изотропный выброс частиц из  $O_1$  со скоростью  $b$ . Параметр выброса  $c = b/w$  при этом  $c$  не превосходит  $\sqrt{2} - 1$ , что предполагает семейство только эллиптических орбит частиц, не имеющих при этом обратного движения. В силу неравенства орбитальных периодов траектории частиц плотно заполняют некоторую область  $\mathbf{D}$ . Под влиянием несферичности тела  $O$  через некоторое время долготы узлов и перицентров орбит распределятся по окружности и область  $\mathbf{D}$  станет телом вращения, топологическим полноторием. Ту же картину можно наблюдать при многократной бомбардировке метеоритами маломассивного спутника типа Фобоса. Ранее в [1, 2] были получены уравнения поверхности  $\mathbf{D}$ .

В настоящей работе представлены результаты численных экспериментов по разлету частиц, их распределению внутри  $\mathbf{D}$ , а также выводятся площадь сечения и объем  $\mathbf{D}$ .

**Список литературы**

1. Холшевников К. В., Орлов С. А. Пылевой тор. I. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 1. 2000. Вып. 3 (№ 17). С. 118.
2. Орлов С. А., Холшевников К. В. Пылевой тор. III. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц с учетом движения узлов и перицентров // Там же. Сер. 1. 2004. Вып. 1 (№ 1). С. 112.

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПЛОСКОСТИ ГАЛАКТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-СГЛАЖИВАНИЯ

С помощью вейвлет-сглаживания исследовано распределение молодых объектов (рассеянных звездных скоплений, классических цефеид и областей HII) в проекции на плоскость Галактики. При этом для РЗС и цефеид использовалось разделение этих объектов на возрастные группы. Показано, что примененная сглаживающая процедура позволяет успешно исследовать крупномасштабную структуру распределения молодых объектов. Все эти объекты с возрастными вплоть до  $10^9$  лет позволяют выявить однотипные элементы спиральной структуры, внешний вид которой в основном определяется правильным чередованием вдоль отрезков спиральных ветвей молодых и более старых звездных комплексов. Комплексы разного возраста слабо перекрываются в диске Галактики. В частности, в рукаве Киля—Стрельца более старый звездный комплекс располагается между двумя молодыми, а для ветви Ориона выделяются два молодых сгущения между тремя более старыми.

Для рукавов Киля—Стрельца и Ориона хорошо заметен сдвиг сгущений старых объектов относительно молодых, соответствующий отстающему движению спиральных волн плотности. Сгущения в области рукава Персея не показывают обратного сдвига относительно рукавов Киля—Стрельца и Ориона. Последнее позволяет сделать вывод, что область коротации не находится вблизи Солнца и, вероятно, расположена за ветвью Персея.

Четырехрукавная спиральная структура с ветвями, исходящими из центра Галактики в нашей звездной системе, получается в том случае, если главными являются ветви Киля—Стрельца и внешняя, расположенная за ветвью Персея. Если все наблюдаемые ветви считать основными, то получается 12-рукавная структура, противоречащая размеру области, в которой структура наблюдается в нашей Галактике. Возможным путем решения данного противоречия является вариант, когда ветви исходят не из центра Галактики, а из кольца, описываемого бароподобной структурой достаточной протяженности.

**БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ  
ПО ИНТЕНСИВНОСТЯМ РАДИОЛИНИЙ МЕТАНОЛА**

Для проведения приближенных оценок физических параметров межзвездных молекулярных облаков создана база населенностей энергетических уровней метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Схема включает 861 уровень  $\text{CH}_3\text{OH-A}$  и 852 уровня  $\text{CH}_3\text{OH-E}$  с квантовыми числами  $J \leq 22$ ,  $|K| \leq 9$  и энергиями верхнего уровня  $\leq 1015.5 \text{ см}^{-1}$  для  $\text{CH}_3\text{OH-A}$  и  $\leq 1020.2 \text{ см}^{-1}$  для  $\text{CH}_3\text{OH-E}$ . В схему включены вращательные уровни первого и второго крутильных состояний. Моделирование процессов переноса излучения проводилось в приближении большого градиента скорости. При этом учитывались процессы поглощения и излучения на пыли внутри облака.

Значения параметров варьировались в пределах: плотность водорода  $\lg(n_H [\text{см}^{-3}])$  — от 3.0 до 7.0; кинетическая температура  $T_k$  — от 10 до 220 К; удельная лучевая концентрация метанола  $\lg(N_{\text{CH}_3\text{OH}}/\Delta V [\text{см}^{-3} \cdot \text{с}])$  — от 8.0 до 11.0; относительное содержание метанола  $\lg(N_{\text{CH}_3\text{OH}}/N_{\text{H}_2})$  — от  $-8$  до  $-6$ . Считалось, что температура пыли равна кинетической температуре газа. Ширина линий принималась равной 5 км/с.

Проведено сравнение оценок физических параметров областей массивного звездообразования, полученных в результате детального анализа, учитывающего ширины линий конкретных объектов, с приближенными оценками параметров, полученными на основе базы населенностей с шириной линий 5 км/с.

Показано, что база населенностей позволяет достоверно оценить ряд физических параметров для молекулярных облаков с ширинами линий от 2.5 до 10 км/с.

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ AMR-КОД  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ  
САМОГРАВИТИРУЮЩИХ МГД-ТЕЧЕНИЙ**

Представлен многомерный численный AMR-код Megalion MP для моделирования самогравитирующих магнитогазодинамических течений на массивно-параллельных (многопроцессорных) и распределенных (кластеры) вычислительных системах. Основу кода составляет разностная схема Рунге-Кутты повышенного порядка точности [1]. Уравнение Пуассона для гравитационного потенциала решается численно с помощью распараллеленного метода сопряженных градиентов с использованием многосеточной техники. При проектировании коммуникаций учтен неструктурированный иерархический характер данных. Проведено тестирование коммуникаций на виртуальных параллельных компьютерах. В коде реализован алгоритм автоматической параллельной генерации иерархической сетки с учетом оптимальной балансировки вычислительной и коммуникационной нагрузок. Данный алгоритм основан на анализе точек параметризующей кривой (кривой Мортон, Гильберта или др.), находящихся на границе раздела областей сетки, контролируемых различными процессами. Кроме того, реализованы алгоритмы динамической перестройки иерархической сетки и перераспределения сетки между процессами в ходе вычислений. Для проверки эффективности работы и вычислительных качеств параллельного кода Megalion MP проведены тестовые расчеты (объемный взрыв, коллапс ПЗО, аккреция на компактный объект). Расчеты проводились на кластере вычислительной лаборатории Института астрономии РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 05-02-17070 и гранта РФФИ — Урал № 04-02-96050.

**Список литературы**

1. А. Е. Дудоров, А. Г. Жилкин, К. Е. Степанов, и др. Численный AMR-код для моделирования коллапсирующих протозвездных облаков // VII Забабахинские науч. чтения: Материалы. докл. 2003.

## МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Решение большинства динамических задач околосолнечного и околопланетных движений требует знания высокоточных положений больших планет Солнечной системы. С этой целью нами были заимствованы оскулирующие элементы орбит из астрономических ежегодников Российской академии наук института прикладной астрономии. На этой основе была написана программа, позволяющая находить положение больших планет Солнечной системы в некотором интервале. На следующем этапе работы нами были заимствованы результаты численной теории DE405 Лаборатории реактивного движения США в виде коэффициентов полиномов Чебышева [2]. Написана динамически подключаемая библиотека (DLL), входными параметрами для которой являются коэффициенты полиномов Чебышева, выходными — положения и компоненты вектора скорости следующих небесных тел: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, Луна, Солнце, Барицентр Солнечной системы, Барицентр системы Земля—Луна. Интервал вычислений охватывает период с 9 декабря 1599 по 20 декабря 2201 г. Созданное программное обеспечение применено для исследования эволюции орбиты кометы Комас Соля (1927 III) на интервале с 1656 по 2060 г. Интегрирование движения кометы проводилось методом Рунге—Кутты 10-го порядка, программное обеспечение которого разработано студентом кафедры астрономии Одесского национального университета И. Кара. Полученные изменения орбиты кометы хорошо согласуются с результатами Н. А. Беляева [1].

## Список литературы

1. *Беляев Н. А.* Эволюция орбит комет Неуймина 2 (1916 II), Комас Соля (1927 III) и Швасмана—Вахмана 2(1929 I) за 400 лет //Астроном. журн. 1967. Т. 44, № 2. С. 461.
2. ftp server [ssd.jpl.nasa.gov](http://ssd.jpl.nasa.gov)

**З. Н. Турлов, В. Г. Грачев, К. А. Иванов**  
Институт астрономии РАН

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ КА**

В современных условиях интенсивного освоения космического пространства резко увеличивается число космических объектов искусственного происхождения — как активно функционирующих, так и отработавших свой ресурс и находящихся во всех высотных зонах. Исходя из этого, возникает необходимость определения типа, функциональных особенностей и технического состояния КА. Для решения данной задачи в качестве дополнительного признака, предлагается использовать оценку спектрального коэффициента отражения материалов покрытий КА. В докладе рассмотрены основные этапы алгоритма определения спектральных коэффициентов отражения для различных материалов, используемых в космической технике.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СКОПЛЕНИЙ  
ГАЛАКТИК В РАМКАХ ЗАДАЧИ  $N$  ТЕЛ.  
ОБРАЗОВАНИЕ СВЕРХМАССИВНЫХ  $cD$ -ГАЛАКТИК**

Скопления галактик гравитационно связаны, но не сгруппированы, и поэтому, часто представляют собой неправильные группы галактик. В их центрах часто расположены сверхмассивные ( $\sim 10^{13} M_{\odot}$ ) сфероидальные  $cD$ -галактики, в ядрах которых обычно обнаруживаются квазары — сверхмассивные аккрецирующие черные дыры — мощные источники энергии, обнаруживаемые до  $z = 6$ .

Образование сверхмассивных черных дыр трактуется в рамках формализма динамического трения, которое проявляется при коллективных взаимодействиях галактик в скоплениях, в результате чего перераспределяется гравитационная и кинетическая энергии между галактиками. Перераспределение происходит таким образом, что менее массивные объекты, приобретая кинетическую энергию, устремляются к периферии скопления, либо совсем его покидают в случае, если их скорость достигает второй космической для скопления, а более массивные объекты — наоборот, теряя свою кинетическую энергию, тормозятся и скатываются к центру скопления.

Основными уравнениями «столкновительной» динамики галактик скопления являются уравнения движения  $N$  галактик, свободно перемещающихся в поле тяготения, задаваемого ньютоновским потенциалом.

Используется численная реализация, построенная на скоростной формулировке алгоритма Верлета и др., которая представляет собой консервативную схему — полная масса и энергия сохраняются на каждом счетном шаге — и дополнена «блоком слияния» для пары галактик, вставленного в подпрограмму счета гравитационной энергии и ускорений на каждом шаге для  $k$ -галактики. Условия слияния — превышение суммы радиусов двух взаимодействующих галактик расстояния между ними и ограничение скорости сближения пары галактик критерием удвоенной кеплеровской скорости.

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОМЕТРИИ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

Работа посвящена достаточно необычному методу оптических исследований тропосферы Земли, основанному на поверхностной фотометрии Луны во время ее полных теневого затмения. В этот момент становится возможным провести дистанционные измерения поглощения света в атмосфере над большой территорией вдоль лимба Земли, видимого с Луны. Теоретические основы метода заложены в [1]. Цель настоящей работы — его применение для анализа глобального распределения аэрозоля в тропосфере.

Основой работы являются фотометрические наблюдения полных лунных затмений 4 мая и 28 октября 2004 г., проведенные в Южной Лаборатории ГАИШ (п. Научный, Крым). Поверхностная яркость различных областей лунного диска измерялась вне затмения, в полутени и тени Земли. Наблюдения проводились на границе видимой и инфракрасной области спектра вне полос поглощения атмосферы.

Благодаря большим угловым размерам Луны оптическая плотность была измерена на значительной площади тени, что позволило построить ее радиальную зависимость для широкого диапазона позиционных углов. Сопоставление этой зависимости с теоретической кривой для газовой атмосферы дало возможность установить высотное распределение величины аэрозольного поглощения для разных пунктов вблизи лимба Земли. Полученные данные о пространственных вариациях аэрозоля сравнивались с метеорологической картой на дату наблюдения. Значение характерной высоты приземного аэрозольного слоя (7–12 км) находится в удовлетворительном согласии с данными, полученными другими методами [2].

### Список литературы

1. Линк Ф. Лунные затмения. М.: Иностран. лит., 1962.
2. Угольников О. С. Поляризационные исследования атмосферы Земли // Физика космоса: Тр 35-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург 30 янв.—2 февр. 2006 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006.

**АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ  
В УЗКОПОЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВАХ НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В астрономии наибольшее распространение для наблюдения за космическими объектами искусственного происхождения получили оптико-электронные средства. Специфика данных средств проявляется в том, что наблюдение космических объектов возможно только в отраженных солнечных лучах на фоне опорных звезд, что позволяет получить высокоточные координатные измерения. Однако для определения высокоточных значений элементов орбиты необходимы высокоточные измерения положений заданного КА и методы обработки данных измерений. В качестве средств получения высокоточных измерений предполагается использование оптико-электронных оптических средств наблюдения с приемником излучения на основе ПЗС-матриц с разрешением не менее  $1024 \times 1024$  элементов. При этом достижение требуемого разрешения порядка 0.2 угловых секунды возможно только при полях зрения оптической системы менее 10 угловых минут, что накладывает ограничение на количество опорных звезд в телевизионном кадре. Исходя из этого, возникла необходимость в разработке новых алгоритмов обработки измерений, чему и посвящен доклад.

**К. И. Чурюмов**

Astronomical Observatory of Kyiv national Shevchenko university

**SIZES OF AN ARTIFICIAL CRATER ON THE SURFACE  
OF THE COMET 9P/TEMPEL**

The copper impactor of the spacecraft Deep Impact which has mass of 372 kg, successfully collided with the 6-km icy nucleus of short-periodic comet 9P/Tempel 1 at velocity of 10.2 km/s on July 4, 2005. As one of results of collision an artificial impact crater was formed on the surface of the comet Tempel 1 nucleus. Using theoretical model (Opik's model) of collision of the copper impactor with the comet 9P nucleus the possible crater diameter on the nucleus of comet Tempel 1, formed by the impactor, must be equal from 22 to 57 m and its depth must be equal from 4.8 to 5.6 m. Our results differ noticeably from results obtained others investigators of crater formation during this unique space experience. Unfortunately the real size of artificial crater in the course of the Deep Impact mission was not determined. The report was made together with the co-authors prof. V. G. Kruchinenko and PhD student L. S. Chubko.

Н. Н. Шахворостова, М. С. Бургин, В. Л. Кауц  
Астрокосмический центр ФИАН, Москва

## О ВЛИЯНИИ УДАРНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ СПЕКТР ВОДОРОДА

Одним из приближений, часто используемых при анализе физических процессов в космологической плазме, является предположение о том, что зависимость населенностей возбужденных состояний от углового квантового числа  $l$  соответствует равновесному распределению. Это приближение применено в наиболее полных современных расчетах [1], которые используются при интерпретации наблюдений анизотропии реликтового излучения.

При расчетах интенсивностей субординатных линий в космологическом рекомбинационном спектре определяющее значение имеют отличия населенностей от равновесных, так как при точном равновесии с континуумом числа нескомпенсированных переходов в линиях равны нулю в силу принципа детального равновесия и образования избыточных фотонов в линиях не происходит. В этой задаче изменение величины слабых отклонений от равновесия с континуумом может оказать существенное влияние на результат [2].

В работе в модели атома водорода с четырьмя связанными состояниями ( $1S$ ,  $2S$ ,  $2P$  и уровень  $n = 3$ , рассматриваемый без учета расщепления по угловому квантовому числу) изучено влияние ударных переходов  $2S \leftrightarrow 2P$  на населенности состояний  $2S$  и  $2P$  в эпоху космологической рекомбинации водорода. Показано, что ударные переходы не приводят к термализации распределения населенностей в функции углового момента. Рассматриваемые ударные переходы приводят к относительному изменению интенсивности рекомбинационной линии  $H_\alpha$ , не превышающему  $10^{-3}$ , так что при расчетах кинетики космологической рекомбинации и космологического рекомбинационного спектра их влиянием можно пренебречь.

### Список литературы

1. *Seager S., Sasselov D. D., Scott D.* Ap. J. Suppl. 2000. Vol. 128. P. 407.
2. *Дубрович В. К., Шахворостова Н. Н.* ПАЖ. 2004. Т. 30. С. 563.

## Стендовые доклады

S. Goedhart<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>2</sup>, А. Б. Островский<sup>2</sup>,  
J. van der Walt<sup>3</sup>, M. Gaylard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>HartRAO, <sup>2</sup>Уральский государственный университет, <sup>3</sup>NWU

### VARIABILITY OF CLASS II METHANOL MASERS

Long-term monitoring at Hartebeesthoek has shown that methanol masers at 6.7 and 12.2 GHz are highly variable (Goedhart et al., 2004; Gaylard et al., 2002). A wide range of behavior is seen: some sources exhibit random flaring, quasi-periodic behavior and seven sources in the sample have been found to be periodic.

We will explore possible mechanisms for the causes of the maser variability. The source G9.62+0.20E shows synchronized, periodic flares at 6.7, 12.2 and 107 GHz. Model calculations show small fluctuations in dust temperature can lead to the flares seen.

Different causes of class II methanol maser variability in G9.62+0.20E are considered. Analysis of those shows that the small fluctuations in dust temperature the variability is most likely reflects the character of accretion processes onto massive young stellar objects.

Model calculations show small fluctuations in dust temperature can lead to the flares seen. When the dust temperature is in the range 110–130 K it is sufficient to have changes of the order of a few per cent. Such fluctuations can arise due to the changes in amount of radiation from the young stellar object which comes to the maser forming region. These changes can be caused by the variability of the source itself or by the movements of material in between the central young stellar object and the maser forming region. Both phenomena are likely to be related to the accretion processes. Preliminary analysis shows that observed ranges of variability in different maser lines can be reproduced in the models with the densities in the range  $\lg(n_H [\text{cm}^{-3}]) = 5 - 6$  and specific column densities around  $\lg(N_{CH_3OH}/\Delta V [\text{cm}^{-3}\cdot\text{c}]) = 11.5$ .

**ПОИСК АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
МИНИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ  
МЕЖДУ ДВУМЯ КЕПЛЕРОВСКИМИ ОРБИТАМИ  
СРЕДСТВАМИ СИМВОЛЬНОЙ АЛГЕБРЫ**

Задача нахождения оптимального алгоритма определения минимального расстояния между двумя кеплеровскими орбитами с общим гравитационным центром по имеющимся элементам орбит с целью выявления опасных в смысле столкновения положений объектов неоднократно исследовалась ранее. В данной работе предлагается метод поиска подобного алгоритма средствами символьной алгебры. Решение не основано на численном методе и в случае успешной реализации позволило бы проводить систематические исследования различных конфигураций орбит. Взаимное расположение двух объектов на кеплеровских орбитах с общим гравитационным центром рассматривается на математической модели механической конструкции со сферическим шарниром в основании и двумя сегментами переменной длины, соединенными плоским шарниром (так называемая «рука робота»). Сферический шарнир располагается в общем фокусе, в начале исходной системы координат (ИСК), а плоский шарнир и свободный конец второго сегмента лежат на эллиптических траекториях, соответствующих исследуемым орбитам, их координаты в ИСК известны. Для данной конфигурации орбит требуется найти такие положения объектов, при которых длина второго сегмента  $l_x$  меньше допустимого значения, для чего рассматривается обратная кинематическая задача. Составляется матрица преобразования координат, на основе которой создается полиномиальный идеал и вычисляется его базис Гребнера. Так, были найдены углы поворота для преобразований системы координат. Была также составлена матрица преобразования координат при наиболее простом расположении объектов с учетом полученных углов, для которой были получены идеал и базис Гребнера. Был проведен поиск допустимых «специализаций».

Д. З. Вибе<sup>1</sup>, Я. Н. Павлюченков<sup>1</sup>,  
Р. Лаунхардт<sup>2</sup>, Т. Хеннинг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН,

<sup>2</sup>Институт астрономии Общества им. М. Планка

## ХИМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ДОЗВЕЗДНОГО ЯДРА СВ17

Проведено детальное теоретическое исследование изолированной глобулы СВ17 (L1389), основанное на спектральных картах линий CS, HCO<sup>+</sup>, C<sup>18</sup>O, C<sup>34</sup>S и H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>. Показано, что основными факторами, влияющими на спектры, являются интенсивность внешнего УФ-поля, вероятность прилипания молекул к пылинкам, возраст глобулы и скорость ее вращения. Перечисленные параметры могут быть уверенно оценены в том случае, когда для анализа используется не только центральный спектр, но полная спектральная карта исследуемого объекта. Предложен общий критерий, позволяющий получить количественную оценку согласия теоретических и наблюдаемых спектральных карт. Показано, что эффективный коэффициент прилипания в ядре СВ17 заключен в пределах 0.3–0.5. Пространственное распределение интенсивностей и величины самопоглощения оптически толстых линий свидетельствует о том, что ядро подвергается слабой УФ-засветке. С помощью аппроксимации одновременно оптически тонких линий C<sup>18</sup>O, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> и C<sup>34</sup>S, а также оптически толстых линий HCO<sup>+</sup> и CS найдена модель, которая воспроизводит все наблюдаемые спектры. Асимметрия линий в СВ17 объясняется комбинацией сжатия, вращения и турбулентных движений со скоростями  $\sim 0.05$ ,  $\sim 0.1$  и  $\sim 0.1$  км с<sup>-1</sup> соответственно. Химический возраст ядра — около 2 млн лет, на что указывает центральное истощение молекул CO, CS и HCO<sup>+</sup>. Величина углового момента ядра указывает, что при последующем сжатии оно фрагментирует с образованием двойной (кратной) звезды.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ 04-02-16637.

## ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ДО SZ САМ И МАССЫ ТРЕТЬЕГО ТЕЛА

На основе элементов орбиты третьего тела, вычисленных по фотометрическим (телескоп АЗТ-3  $D = 0.45\text{м}$  АО УрГУ) и спеклинтерферометрическим (6-м телескоп САО РАН) наблюдениям затменной двойной SZ Сам, а также данных из литературы получены оценки массы третьего тела  $M_3 = 23.4M_\odot$  и расстояния до системы SZ Сам  $d = 1125$  пк.

Большое значение массы третьего тела позволяет сделать вывод о его двойственной природе. Полученная оценка расстояния до системы SZ Сам на 250 пк превышает значение расстояния до рассеянного звездного скопления NGC 1502 [1], в центр которого проектируется эта затменная двойная. Учитывая тот факт, что размеры рассеянных звездных скоплений не превышают 50 пк [2], можно сделать вывод, что SZ Сам не является членом NGC 1502, как это считалось ранее.

### Список литературы

1. *Loktin A. V., Gerasimenko T. P., Malysheva L. K.* // *Astron. Astrophys. Trans.* 2001. Vol. 20. P. 607.
2. *Danilov V. M., Seleznov A. F.* // *Ibid.* 1994. Vol. 6. № 2. P. 85.

П. Е. Захарова, Э. Д. Кузнецов, Д. В. Гламазда  
Астрономическая обсерватория УрГУ

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ В ОКРЕСТНОСТИ УСТОЙЧИВОЙ ТОЧКИ ЛИБРАЦИИ

В 2005 г. в ходе модернизации телескопа СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрГУ (замена светоприемника — установка ПЗС-камеры Alta U32) проведено три сеанса наблюдений (10 февраля, 29 сентября, 30 ноября 2005 г.) геостационарной области в окрестности устойчивой точки либрации с долготой  $75^\circ$ .

Наблюдения проводились с целью отработки методики, отладки программного обеспечения, а также для обзора окрестности устойчивой точки либрации  $75^\circ$ . Зоны обзора составили:  $8^\circ$  (по часовому углу)  $\times$   $7^\circ$  (по склонению) в первом и во втором сеансах,  $6^\circ \times 5^\circ$  — в третьем.

После установки ПЗС-камеры поле зрения системы составляет  $60' \times 40'$ . Наблюдения проводились при выключенном часовом механизме. Время экспозиции 10 с. Фиксировались спутники до  $14^m$ — $15^m$ . Астрометрическая обработка выполнялась для спутников ярче  $13.5^m$ .

В первом сеансе наблюдений было обнаружено 11 объектов при однократном обзоре зоны, во втором — 34 (при двукратном обзоре), в третьем — 49 (при четырехкратном). Рост числа наблюдаемых объектов при увеличении кратности обзора связан с тем, что объекты с большими наклонами орбит проходят область обзора менее чем за час.

По результатам третьего сеанса наблюдений определены и улучшены орбиты двух геостационарных спутников, выполнено отождествление одиночных наблюдений с 14 объектами каталога геостационарных спутников. По результатам улучшения орбит пассивных геосинхронных объектов точность определения положений составила  $2''$ — $3''$ .

Выполненные наблюдения подтвердили правильность технических решений, примененных при замене светоприемника, показали перспективность методики проведения наблюдений и надежность алгоритмов обработки результатов измерений.

А. А. Калинин, В. В. Крушинский,  
А. И. Шагабутдинов  
Астрономическая обсерватория УрГУ

**СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ  
ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЕЧНОМ ТЕЛЕСКОПЕ  
АЦУ-5 АО УРГУ С ПОМОЩЬЮ ПЗС-МАТРИЦЫ  
SXV-H9 STARLIGHTXPRESS**

На спектрографе АЦУ-5 солнечного телескопа АЦУ-5 выполнена замена светоприемника. В фокусе спектрографа в специально изготовленном адаптере установлена ПЗС-камера SXV-H9 (производство фирмы StarlightXpress, Великобритания). ПЗС-камера имеет матрицу, состоящую из  $1394 \times 1040$  элементов размером  $6.45 \times 6.45$  мкм. Время передачи полного кадра в ЭВМ по интерфейсу USB 2.0 составляет 8 с, кадра с бинированием — 3.5 с. Высокая скорость передачи позволяет в 6 раз увеличить количество получаемого наблюдательного материала и калибровочных кадров. При обработке полученных данных использована методика, аналогичная применяемой на телескопе THEMIS (Франция—Италия). Проведены пробные наблюдения солнечных протуберанцев в линиях водорода, кальция и гелия. Линия гелия 1083 нм регистрируется в протуберанцах за 60 с, линия К ионизованного кальция — за 3 с, линия водорода  $H\alpha$  — за 1 с.

Н. Д. Калинина  
Астрономическая обсерватория УрГУ

**ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  
И ЛУЧЕВЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛ  
CH<sub>3</sub>CN И CH<sub>3</sub>OH В ЯДРЕ W3(OH)**

Юго-восточная часть гигантского молекулярного облака W3 содержит ядро W3(OH), ассоциирующееся с гидроксильными мазерами и сверхкомпактной зоной НП вокруг молодой звезды класса O, и ядро W3(H<sub>2</sub>O), содержащее молодой звездный объект и водяные мазеры.

По результатам обработки спектрального обзора области массивного звездообразования W3(OH) стандартным методом вращательных диаграмм для молекул CH<sub>3</sub>CN и CH<sub>3</sub>OH получены вращательные температуры  $T_{rot}$  и лучевые концентрации  $N_m$ . Для молекулы метанола —  $T_{rot} = 77$  К,  $N_m = 9.2 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>. Для молекулы метилцианида —  $T_{rot} = 52$  К,  $N_m = 3.3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>.

Наблюдения проводились на телескопе OSO-20M в Онсала (Швеция) в период с 1999 по 2002 г. в направлении с координатами  $\alpha_{1950} = 02^h 23^m 17.300^s$ ,  $\delta_{1950} = 61^\circ 38' 58.00''$  в диапазоне частот 84–115.5 ГГц.

**ОБНАРУЖЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
БЛЕСКА С ПЕРИОДОМ 3.353 Ч  
В СВЕРХМЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ИСТОЧНИКЕ  
RX J0019.8+2156 (QR AND)**

Сверхмягкие рентгеновские источники (supersoft sources — SSS) представляют собой двойные системы, состоящие из звезды-донора и белого карлика, на поверхности которого происходит непрерывное термоядерное горение аккрецируемого водорода. Для детальных оптических исследований доступен только один из них, RX J0019.8+2156 (QR And). Эта звезда показывает периодические колебания блеска с периодом 15.85 ч, который интерпретируется в литературных источниках как орбитальный период, и квазипериодические колебания с характерными периодами в несколько часов. Непродолжительные наблюдения RX J0019.8+2156 (QR And), проведенные на многоканальном фотометре и 70-см телескопе Коуровской обсерватории в 2003 г., показали, что квазипериодические колебания могут маскировать строго периодические колебания с периодом в диапазоне нескольких часов. Более продолжительные наблюдения были проведены в 2005 г. в течение 14 ночей (87 ч). Анализ этих наблюдений позволил впервые обнаружить строго периодические колебания блеска с периодом  $3.353 \pm 0.003$  ч. Если считать период 15.85 ч орбитальным периодом, то обнаруженные колебания с периодом 3.353 ч можно объяснить наличием на поверхности белого карлика пятен и его вращением с этим периодом. Однако имеющиеся в литературе данные о лучевых скоростях говорят о том, что звезда-донор в системе RX J0019.8+2156 (QR And) имеет малую массу, заключенную в пределах 0.3–0.5 массы Солнца. Звезда такой массы при орбитальном периоде 15.85 ч не может заполнять полость Роша и передавать вещество белому карлику. Для этого необходимо, чтобы орбитальный период был менее 8 ч. Следовательно, обнаруженный нами период 3.353 ч может быть истинным орбитальным периодом, так как, предположив это, мы можем устранить противоречие в представлениях о строении объекта RX J0019.8+2156 (QR And). Тогда известный ранее фотометрический период 15.85 ч может оказаться периодом прецессии аккреционного диска.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ТЕЛЕСКОПА КАССЕГРЕНА

Уменьшение фокусного расстояния системы Кассегрена было актуальным еще при наблюдениях на фотоэмульсиях. Использование преобразователя позволяет увеличить светосилу телескопа при том же диаметре, что существенно сокращает время экспозиции и увеличивает поле зрения. С появлением твердотельных матричных светоприемников, имеющих высокую квантовую эффективность, но весьма малые линейные размеры, задача увеличения поля зрения вышла на первое место.

Было рассмотрено несколько вариантов преобразователей. Если изначально система имела весьма умеренное относительное отверстие, то возможно применение в качестве преобразователя простого ахроматического дублета. Он позволяет уменьшить фокус системы в два раза, почти не внося дополнительных аберраций.

Применяя трех- или четырехлинзовую систему, содержащую специальные стекла, можно уменьшить фокус в 3–4 раза, при этом фокальная плоскость сильно смещается и может оказаться внутри трубы телескопа. Изготовление подобных редукторов весьма затруднительно, но они позволяют получить хорошо исправленное поле до одного градуса.

Получить внешнее расположение фокальной поверхности можно, используя промежуточное изображение. В этом случае коллиматор превращает телескоп в афокальную систему, а стоящий за ним объектив строит изображение. Длина подобных преобразователей весьма велика, и фокус сильно удален от трубы, что не всегда удобно.

Нами предложен вариант редуктора сочетающего обе схемы. Ахроматический дублет уменьшает фокус в два раза и строит промежуточное изображение внутри трубы, затем следует коллиматор и объектив. Смещение фокальной поверхности умеренное. Немаловажным является использование стандартных оптических элементов, что удешевляет конструкцию.

Расчеты выполнялись в программе ZEMAX для системы Кассегрена с диаметром главного зеркала 500 мм и относительным фокусом  $F/D=22$ .

## ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ГЕОСИНХРОННОЙ ОРБИТЫ КРИТИЧЕСКОГО НАКЛОНА

Исследована эволюция элементов геосинхронной орбиты критического наклона с умеренным начальным значением эксцентриситета 0.20–0.27. Движение спутника на интервале времени 30 лет моделировалось с помощью «Численной модели движения ИСЗ» (НИИ ПММ при ТГУ), учитывающей основные возмущающие факторы.

Найдены начальные условия, существенно зависящие от долготы восходящего узла орбиты, которые приводят к долгопериодическим (более 30 лет) возмущениям эксцентриситета большой амплитуды. Показано, что эксцентриситет орбиты может превышать значение 0.84 (высота перигея менее 200 км), после чего в течение нескольких десятков суток происходит падение спутника на Землю.

Выполнен анализ эволюции элементов орбит геосинхронных спутников Sirius-1, 2, 3, движущихся по орбите критического наклона с начальным значением эксцентриситета 0.27. Показано, что эксцентриситет орбиты спутника Sirius-2 может достигать значения 0.81 (перигей орбиты погружается в верхние слои атмосферы).

Обнаруженные особенности эволюции геосинхронных орбит с критическими наклонами согласуются с результатами работ [1, 2, 3].

### Список литературы

1. *Лидов М. Л.* О приближенном анализе эволюции орбит искусственных спутников // Проблемы движения искусственных небесных тел. М.: Астроном. Совет АН СССР, 1963. С. 119.
2. *Лидов М. Л., Ярская М. В.* Интегрируемые случаи в задаче об эволюции орбиты спутника при совместном влиянии внешнего тела и нецентральной силы планеты // Космические исследования. 1963. Т. 12, № 2. С. 155.
3. *Прохоренко В. И.* О геометрическом исследовании эволюции орбит ИСЗ, обусловленной сжатием Земли, с учетом гравитационных возмущений от внешних тел // <http://www.iki.rssi.ru/seminar>

Т. П. Никифорова<sup>1</sup>, А. М. Поляков<sup>2</sup>,  
Н. В. Панкратова<sup>2</sup>, Т. В. Струнина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория УрГУ,  
<sup>2</sup>Уральский государственный университет

## НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 13 ИЮЛЯ 2005 Г.

Фотографические наблюдения спектров активной области AR 0786 на северо-востоке солнечного диска, проведенные в АО УрГУ с помощью солнечного телескопа АЦУ-5 и спектрографа АСП-20, позволили обнаружить эмиссию в линиях водорода (4861 H $\beta$ ), магния (триплет 5200 MgI) и ионизованного железа (5169 FeII), которая явилась следствием рентгеновской вспышки средней мощности. Время наблюдений (11h57m – 12h06m UT) практически совпало с начальной фазой рентгеновской вспышки балла M3.2/SF (12h03m – 22h19m – 13h00m UT). Эта вспышка была одной из двенадцати рентгеновских вспышек, которые наблюдались 12–14 июля в AR 0786 вскоре после всплытия нового значимого магнитного потока (по данным Службы Солнца).

Наиболее выражена эмиссия в линиях H $\beta$  и 5169 FeII, она составляет 0.98 и 0.93 от интенсивности непрерывного спектра соответственно. Во всех наблюдавшихся линиях эмиссия структурна. Анализ показал, что линии состоят не менее чем из трех компонент, различающихся по доплеровским скоростям на 3–6 км/с. Кроме того, эмиссия в H $\beta$  структурна также и вдоль спектральной линии, поперек дисперсии она имеет вид зигзага. Значения доплеровских сдвигов эмиссии вдоль линии H $\beta$  имеют противоположные по знаку значения (от +57 до –73 км/с)  $\pm 2.3$  км/с в пределах пространственной структуры протяженностью не более 8000 км. Сравнение с УФ наблюдениями SOHO показало, что это явление не связано с протуберанцем, а связано с быстрой эволюцией низких горячих петель, хорошо видимых в линии 304 HeII. С учетом начальной фазы вспышки наблюдаемую эмиссию можно интерпретировать как движение плазмы вдоль петли вблизи ее вершины.

А. Б. Островский<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>1</sup>,  
М. А. Воронков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет, <sup>2</sup>ATNF CSIRO

## РЕЖИМЫ НАКАЧКИ МЕТАНОЛЬНЫХ МАЗЕРОВ I КЛАССА

Мазерное излучение молекулы метанола во многих вращательных переходах зарегистрировано в многочисленных областях массивного звездообразования. Мазерные переходы метанола делятся на два класса, природа процессов накачки которых существенно отличается. Особенности процессов накачки мазеров I класса остаются малоизученными. В работе приводятся анализ наблюдательных данных и моделирование условий в областях формирования мазеров I класса, которые позволяют выделить 4 режима, отличающихся набором переходов, в котором образуется наиболее яркая линия.

Мазерный режим с наиболее яркими линиями из серии  $J_{-1} - (J-1)_0E$  представляется наиболее распространенным. Линии  $4_{-1} - 3_0E$  на 36.1 ГГц и  $5_{-1} - 4_0E$  на 84.5 ГГц являются мазерными при условиях, обычных для областей массивного звездообразования.

Во втором режиме самыми яркими являются линии из серии  $J_0 - (J-1)_1A^+$ . Предварительный теоретический анализ накачки показывает, что линии этой серии становятся ярчайшими в моделях с высокой направленностью излучения ( $> 20$ ) и умеренными лучевыми концентрациями.

Третий режим не так распространен. Наиболее яркими в этом случае становятся линии серии  $J_2 - J_1E$  с частотами, близкими к 25 ГГц. Линии этой серии предпочитают высокие удельные лучевые концентрации ( $\lg(N_{CH_3OH}/\Delta V[cm^{-3}s]) > 12$ ), сравнительно высокие температуры ( $T_k = 75 - 100K$ ) и плотности ( $\lg(n_H[cm^{-3}]) = 5 - 7$ ).

Впервые обнаружен четвертый мазерный режим с ярчайшей линией на 9.9 ГГц из серии  $J_{-2} - (J-1)_{-1}E$ . Наблюдения на радиоинтерферометре АТСА показали, что этот режим определенно реализуется в G343.12-0.06 и W33A. Эта линия становится самой яркой в моделях с высокими лучевыми концентрациями, большими направленностями излучения, более низкими плотностями или более высокими температурами ( $T_k > 100K$ ) в сравнение с третьим режимом.

**Е. Л. Перевозкина**

Министерство общего и профессионального образования  
Свердловской области

## **АНАЛИЗ ВОЗРАСТОВ МАЛОМАССИВНЫХ РГП-СИСТЕМ**

На основе эмпирического закона торможения Скуманича [1] проведено определение минимального и максимального значений возрастов спутников маломассивных разделенных систем главной последовательности (РГП-систем) из каталога [2] (масса спутника  $0.8\text{--}2.5 M_{\odot}$ ). Анализ полученных результатов показал, что значения возрастов спутников РГП-систем, полученные по методу изохрон, выполненных в диаграмме светимость — эффективная температура, значения возрастов РГП-систем, усредненные по вышеназванному методу и по эволюционным трекам в диаграмме светимость — эффективная температура, а также значения возрастов, полученные другими исследователями в разное время [2], расположены между минимальными и максимальными значениями возрастов, полученных по закону торможения Скуманича на диаграмме масса спутника — возраст. Для спутников  $0.8\text{--}1.6 M_{\odot}$  наилучшим образом согласуются максимальные значения возрастов спутников, полученные по закону торможения Скуманича, и значения возрастов, полученные по методу изохрон, выполненных в диаграмме светимость — эффективная температура [2].

### **Список литературы**

1. Федорова А. В., Тутуков А. В. //Астроном. журн. 1994. Т. 71, вып. 3. С. 431.
2. Свечников М. А., Дремова Г. Н., Перевозкина Е. Л. Определение возрастов для звезд типа РГП из «Каталога орбитальных элементов, масс и светимостей затменных переменных звезд типа РГП с известными фотометрическими и спектроскопическими элементами» М. А. Свечникова и Е. Л. Перевозкиной. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1999. С. 133.

**Е. Л. Перевозкина**

Министерство общего и профессионального образования  
Свердловской области

## **ПЛАНЕТА ПО ИМЕНИ БАХЧИВАНДЖИ**

12 апреля 2006 г. исполнится 45 лет со дня полета Ю. А. Гагарина в космос. А ведь первые шаги освоения человеком ракетного двигателя начинались на Урале, в том числе недалеко от Коуровки, в поселке Билимбай. 15 мая 1942 г. впервые в мире был совершен успешный полет ракетного самолета БИ-1 со скоростью до 600 км/ч и более. Его пилотировал Г. Я. Бахчиванджи, первый представитель человечества, которому удалось сделать успешный шаг в освоении космической техники в годы Великой Отечественной войны. В 1943 г. скорость ракетного самолета удалось повысить до 800 км/ч. Однако 27 марта 1943 г. на испытаниях БИ-1 разбился и летчик погиб. Григорию Бахчиванджи 20 февраля 2006 г. исполнилось бы 97 лет.

Все, что происходило на Урале в годы войны в связи с созданием и испытанием ракетного двигателя, стало известно в конце 60-х гг. прошлого века, когда в Кольцово была обнаружена могила летчика Г. Бахчиванджи и началась работа учащихся школы № 60 поселка Малый Исток и летчика, заведующего Музеем авиапредприятия «Аэропорт Кольцово» Игоря Павловича Катенева.

Заслуги Бахчиванджи были оценены космонавтами. Ю. Гагарин считал, что без полета Григория Бахчиванджи, может быть, не было бы и 12 апреля 1961 г. 26 апреля 1973 г., через 30 лет после гибели, капитану Григорию Яковлевичу Бахчиванджи было присвоено звание Героя Советского Союза.

Именем героя в 2002 г. был назван один из кратеров на Луне. Сегодня малая планета, посвященная Г. Я. Бахчиванджи, движется по своей орбите в Солнечной системе. Она открыта Н. С. Черных 19 августа 1977 г. и зарегистрирована под каталожным номером 11789 и именем BAKHCIVANDJI. Название утверждено Международным астрономическим союзом 24 июня 2002 г. Соответствующий документ был передан открывателем планет Н. С. Черных Свердловским астрономам во время проведения очередной научной конференции «Физика космоса».

**Г. С. Ромашин**  
Уральский государственный университет

## РОССИЙСКАЯ ГРУППИРОВКА ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

С целью последующей классификации геостационарных и геосинхронных (ГСС) космических аппаратов (КА) проведена систематизация данных о российских ГСС. Составлена таблица ГСС с указанием названия КА, номера по COSPAR, долготы точки стояния, названия точки стояния и времени гарантированного существования на орбите. Обширная библиография дает возможность обратиться к ней для ознакомления с конструктивными особенностями КА. Составлена эволюционная схема развития КА основного изготовителя ГСС в России: НПО ПМ в г. Железногорске Красноярского края. В схему вошли ГСС унифицированных рядов КАУР-3 и КАУР-4, являющиеся конструктивной основой КА «Радуга», «Радуга-1», «Горизонт», «ГАЛС», «Экспресс», «Экспресс-А», «Экспресс-АМ», «Экран» «Экран-М», «Альтаир», «Гейзер». Рассмотрены также КА, работающие на Россию, на других изготовителей, как российских, так и зарубежных: Ямал, LMI-1, Wotun-1.

С. В. Салий, А. М. Соболев  
Астрономическая обсерватория УрГУ

### ЗАВИСИМОСТЬ ОЦЕНОК ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАСТЕЙ МАССИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ОТ ВЫБОРА МОДЕЛИ

По квазитепловым линиям метанола для областей массивного звездообразования G345.01+1.79 и G305.21+0.21 проведен сравнительный анализ наблюдаемых яркостных температур с модельными, полученными на основе:

1) расширенной схемы уровней (861 и 852 уровней А- и Е-метанола, включая 1 и 2 крутильные состояния);

2) сокращенной схемы уровней (190 и 187 уровней А- и Е-метанола основного состояния),

с учетом и без учета влияния внутренней пыли для каждого случая.

Показано, что упрощенные модели без учета влияния внутренней пыли и с укороченными схемами уровней существенно хуже описывают наблюдательные данные.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ в рамках программы (раздел № 3.3, проект № 65624).

## О КИНЕТИКЕ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ВОДОРОДА

Целью работы является расчет кинетики космологической рекомбинации водорода в ранней Вселенной. Подобные вычисления производились в ряде работ различных авторов (см. краткий обзор и ссылки в [1]), наиболее полные расчеты для 300 уровней атома водорода реализованы в [2]. Отличием настоящей работы является то, что в ней вычисляются не населенности уровней, а их небольшие отличия от равновесных значений, что существенно уменьшает вычислительные погрешности. Методика вычисления отклонений населенностей от равновесия с континуумом предложена в [3].

Как известно, увеличение доли нейтральных атомов в основном состоянии происходит в результате нескомпенсированных переходов  $2s \rightarrow 1s$  и  $2p \rightarrow 1s$ . Этот факт позволил свести систему уравнений баланса к одному уравнению, и, таким образом, расчет кинетики рекомбинации был упрощен.

Вычисления производились для различных космологических параметров, было учтено вынужденное двухфотонное излучение методом [4]. Установлено, что учет этого эффекта ускоряет процесс рекомбинации не более чем на 0.4 %. Результаты расчетов кинетики сравнивались с результатами [2], отличие в середине эпохи рекомбинации при  $z \approx 1250$  составляет 5–6 %.

### Список литературы

1. *Seager S., Sasselov D. D., Scott D.* // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2000. Vol. 128. P. 407.
2. *Seager S., Sasselov D. D., Scott D.* *Astrophys. J. Lett.* 1999. Vol. 523 P. L1.
3. *Бургин М. С.* // *Астроном. журн.* 2003. Vol. 80. P. 771.
4. *Chluba J., Sunyaev R. A.* *astro-ph/0508144.*

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКРЫТИЯ КР-СИСТЕМ КАК ЗАТМЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПОЛНОГО ПОТЕМНЕНИЯ ДИСКА ЗВЕЗДЫ К КРАЮ

Целью работы является оценка вероятности открытия КР-систем как затменных переменных при массовых фотографических наблюдениях для случая полного потемнения диска звезды к краю (гипотеза «D»). Согласно классификации М. А. Свечникова [1] КР-системы — это контактные тесные двойные звезды ранних спектральных классов, где оба компонента близки по размерам к соответствующим внутренним критическим поверхностям или заполняют их. Полная вероятность открытия определяется как произведение геометрической и фотометрической вероятностей. Данная величина оценивалась в зависимости от массы главной компоненты, отношения масс звезд и угла наклона орбиты. Было проведено сравнение наших результатов с полученными ранее для равномерно ярких дисков звезд (гипотеза «U»).

### Список литературы

1. *Свечников М. А.* Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Свердловск, 1969.

## Из истории науки

**Т. И. Левитская**  
Уральский государственный университет

*Посвящается светлой памяти  
Бориса Флегонтовича Магуськина,  
профессора кафедры астрономии и геодезии  
Уральского государственного университета*

## **ФЕОДОСИЙ НИКОЛАЕВИЧ КРАСОВСКИЙ И РЕФЕРЕНЦ-ЭЛЛИпсоИД ЕГО ИМЕНИ**

В 2006 г. астрономо-геодезическая общественность отметит особый юбилей — 60-летие утверждения параметров референц-эллипсоида Красовского для производства всех геодезических и картографических работ в бывшем Советском Союзе, социалистических странах, а ныне и в Российской Федерации.

С именем Феодосия Николаевича Красовского [14(26).IX.1878—1.X.1948] связан большой и значимый период становления и развития отечественной геодезии. Ф. Н. Красовский был выдающимся геодезистом XX в., внесшим огромный вклад в науку, значение которого велико и в настоящее время. Своими блестящими достижениями в постановке глобальных геодезических работ и в научном использовании полученных результатов геодезическая наука обязана именно Ф. Н. Красовскому и большому коллективу геодезистов, которыми он руководил и которые были его прямыми учениками и последователями.

Вот основной перечень самых важных вех жизненного пути ученого. С 1917 г. — профессор Межевого института. В 1919—1921 гг. — ректор Межевого института, на базе которого в 1930 г. по инициативе Красовского был создан Московский институт инженеров геодезии, аэросъемки и картографии (МИИГАиК). Под руководством Красовского в 1928 г. был организован Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК). В 1928 г. Красовский разработал программу построения государственной опорной геодезической и нивелирной сети СССР, обосновал принципы и методы обработки триангуляции и уравнивания астрономо-геодезических сетей. Проводил исследования по опреде-

лению размеров земного эллипсоида. Автор уникального труда «Руководство по высшей геодезии» (2 части, 1926—1932). Награжден орденами и медалями СССР, лауреат двух государственных премий (1943, 1952).

Велика заслуга Ф. Н. Красовского в подготовке научных и инженерных кадров в области геодезии. В период с 1937 по 1939 г. Ф. Н. Красовский работал над вторым изданием «Руководства по высшей геодезии». Для того времени эта работа представляла по своей полноте и содержанию наиболее подробный научный труд во всей мировой геодезической литературе. Если бы Ф. Н. Красовский не занимался другими вопросами высшей геодезии, не имел других научных публикаций, кроме Руководства, то только это одно энциклопедическое издание давало право причислить его к выдающимся геодезистам XX в.

Ф. Н. Красовский родился 14 сентября (по старому стилю) 1878 г. в уездном городе Галиче Костромской губернии (ныне Костромской области) в семье бедного служащего при Галичском отделении Костромского окружного суда. Когда Ф. Н. Красовскому исполнилось семь лет, умер отец, Николай Иосифович Красовский, оставив его и трех малолетних сестер на воспитание матери, Александры Алексеевны Красовской, домашней портнихи. После смерти мужа вся тяжесть содержания детей легла на плечи этой самоотверженной женщины. Как вспоминал Ф. Н. Красовский, «мать ухитрилась за несколько сот рублей построить домик, что обеспечило нас квартирой; существовали мы на то, что зарабатывала мать как портниха, и достаточно бедствовали». С шести лет Ф. Н. Красовский учился в галичской уездной школе, которую успешно окончил, обратив на себя внимание учителей своими математическими способностями. Его дядя, Михаил Иосифович Красовский, старший землемер, обратился в Межевой институт с просьбой принять своего племянника в число воспитанников института. В 1891 г. Ф. Н. Красовский был принят в общеобразовательные классы при институте как казенноштатный воспитанник. В 1900 г., после 9 лет обучения, он окончил институт с золотой медалью и был оставлен при институте аспирантом по высшей геодезии и практической астрономии. Будучи аспирантом, Ф. Н. Красовский дополнительно изучал в Московском университете физику и математику, теоретическую механику под руководством известного академика С. А. Чаплыгина, теоретическую и практическую астрономию под руководством профессоров В. К. Цераского и И. М. Ивернова. Его внимание в этот период привлекла зада-

ча определения формы и размеров земного эллипсоида. В 1902 г. в Памятной книжке Межевого института он опубликовал работу «Определение земного трехосного эллипсоида из результатов русских градусных измерений», которая стала по сути его кандидатской диссертацией. В 1903 г. обучение в аспирантуре Ф. Н. Красовского закончилось командировкой в Пулковскую обсерваторию, где он занимался не только астрономией, но и высшей геодезией. Совместно с профессорами Ф. Ф. Витрамом и А. С. Васильевым он участвовал в обработке результатов Шпицбергенского градусного измерения.

С 1903 г. начинается научно-педагогическая деятельность Ф. Н. Красовского, когда он стал преподавать геодезию в Межевом институте, а с 1907 г. — в Московском высшем техническом училище. Вся дальнейшая его деятельность до 1948 г. проходила на кафедре высшей геодезии МИИГАиК, в ЦНИИГАиК, Коллегии ГУГК СССР и Академии наук СССР.

Невозможно в одной статье остановиться на всех направлениях научной деятельности Феодосия Николаевича, которую он проводил всю свою жизнь. Рассмотрим более подробно его исследования, связанные с вопросами изучения фигуры Земли. В начале 30-х гг. Ф. Н. Красовский приступил к работе по выводу размеров эллипсоида на основании градусных измерений СССР, протяженность дуг которых составляла к тому времени около 40 000 км, Западной Европы и США. Вывод параметров земного эллипсоида был центральной проблемой всей научной деятельности Ф. Н. Красовского. На основе обработки и анализа точности материалов триангуляций, созданных к 1930 г., он доказал, что параметры эллипсоида Бесселя существенно отличаются от размеров эллипсоида, наилучшим образом аппроксимирующего огромную территорию Советского Союза, и сделал вывод, что большая полуось эллипсоида Бесселя преуменьшена и эта погрешность составляет  $\sim 850$  м.

В 1934 г. Ф. Н. Красовский выступил на VII Конференции Балтийской геодезической комиссии с докладом «Соображения по установлению эллипсоида для геодезических работ в СССР», в котором обозначил и разрешил ряд принципиальных вопросов обработки астрономо-геодезической сети СССР и установления референц-эллипсоида. Сначала эта работа выполнялась одним Ф. Н. Красовским, а затем под его руководством группой научных сотрудников ЦНИИГАиК. Большие заслуги в выполнении этой работы принадлежат профессору А. А. Изотову. Результаты этого исследования были опубликованы в 1936 г. в ряде статей на страницах журнала «Гео-

дезист» под названием «Обзор и результаты современных градусных измерений». Наиболее интересными являлись статьи, связанные с изложением выводов определения размеров земного эллипсоида для геодезических работ СССР и исследованием фигуры геоида. В них также рассматривались задачи развития градусных измерений, некоторые научные проблемы астрономо-геодезии в связи с изучением строения твердой оболочки Земли. Исследования, которые заняли целое десятилетие, позволили в 1940 г. рекомендовать для вычислений триангуляции новые размеры эллипсоида, наилучшим образом подходящего для территории СССР и ряда пограничных стран. Основные параметры этого эллипсоида и точность их определения характеризуются следующими значениями:

большая полуось  $a = 6\,378\,245 \text{ м} \pm 60 \text{ м}$ ,  
полярное сжатие  $\alpha = 1:298.3 \pm 1.0$ .

При таких параметрах разность полуосей составляет 21.382 км. Таким образом, уже с 1942 г. в СССР при производстве геодезических и картографических работ стал использоваться эллипсоид, определенный Ф. Н. Красовским, вместо эллипсоида Бесселя, который с 1841 г. применялся в России и затем в СССР. После обсуждения результатов работы научной общественностью и в производственных коллективах эти размеры эллипсоида (ныне общепризнанные) были утверждены Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. Позднее эллипсоиду было присвоено имя Красовского.

При решении геодезических задач необходимо знать не только размеры эллипсоида, но и его положение в теле Земли. Такой эллипсоид становится референц-эллипсоидом, т. е. «поверхностью относимости» с определенными размерами его полуосей, особым образом ориентированный в теле Земли и принятый для геодезических работ в данной стране. Эту задачу по ориентированию также выполнил Ф. Н. Красовский. Сущность ориентирования эллипсоида сводится к задаче установления исходных геодезических данных для начального пункта **A** геодезической сети (триангуляции): геодезической широты  $B$ , равной астрономической широте  $\phi$ , геодезической долготы  $L$ , равной астрономической долготе  $\lambda$ , и геодезического азимута  $\beta$ , равного астрономическому азимуту  $\alpha$ . Малая ось референц-эллипсоида будет при этом параллельна оси вращения Земли, плоскость экватора эллипсоида — параллельна плоскости земного экватора, а плоскость начального меридиана эллипсоида — параллельна плоскости гринвичского меридиана. Таким исходным пунктом три-

ангуляции был выбран центр Круглого зала Пулковской обсерватории. От этого пункта берет начало «Система координат 1942 г.», отнесенная к референц-эллипсоиду Красовского.

Решение сфероидических треугольников, вычисление координат пунктов, азимутов, расстояний непосредственно на физической поверхности Земли невозможно вследствие неправильности этой поверхности. Если бы результаты геодезических измерений были отнесены к более гладкой, но волнистой поверхности — поверхности геоида или квазигеоида, то все равно решение перечисленных выше задач было бы невозможным, так как эти поверхности имеют в геометрическом отношении неправильный вид. Геоид довольно хорошо представляет теоретическую фигуру Земли и близко подходит к эллипсоиду вращения — фигуре, хорошо изученной в математическом отношении. Решение различных геодезических задач, математическая обработка и уравнивание геодезических сетей выполняется именно на поверхности референц-эллипсоида, поэтому так важно знать его размеры, которые сумел надежно определить Ф. Н. Красовский. С началом спутниковой эры по изучению движения ИСЗ в гравитационном поле Земли в 1960 г. И. Д. Жонголовичем и в 1963 г. Козан были получены соответственно следующие значения сжатия земного эллипсоида 1:298.3; 1:298.25, что явилось неоспоримым подтверждением значений параметров эллипсоида Красовского. В 1970 г. М. Бурша вывел параметры трехосного эллипсоида: экваториальный радиус — 6 378139 м; полярное сжатие — 1:298.257, что также прекрасно согласуется с результатами Ф. Н. Красовского. Эти значения также свидетельствуют о том, что размеры эллипсоида Красовского достаточно близки к параметрам общего земного эллипсоида. В целях упрощения обработки геодезической сети и удобства использования окончательных результатов в настоящее время осуществляют еще переход от референц-эллипсоида к плоскости. В нашей стране с 1928 г. применяется проекция Гаусса—Крюгера, дающая конформное изображение эллипсоида на плоскости. Время показало, что размеры эллипсоида Красовского, определенные с ошибкой в большой полуоси около  $\pm 60$  м и в полярном сжатии не более одной единицы в знаменателе, следует считать достаточно высокими они отвечают научным и практическим требованиям, предъявляемым к референц-эллипсоиду как основной координатной поверхности — «поверхности относимости».

**М. Н. Начапкин**  
Российский государственный  
профессионально-педагогический университет

### **РОЛЬ В. Н. ТАТИЩЕВА В РАЗВИТИИ РОССИЙСКОЙ КАРТОГРАФИИ**

Для многих людей деятельность Василия Никитича Татищева ассоциируется лишь с основанием в 1723 г. города Екатеринбурга. Мало кто знает, что Татищев был известным историком, автором «Истории Российской с самых древнейших времен», географом, геологом, просвещенным администратором, много сделавшим для развития российской картографии.

В энциклопедическом словаре Ф. Павленкова дано следующее объяснение слова «картография»: «картография — наука, относящаяся к правильному составлению географических карт» [1]. История картографической науки России до Петра Великого была довольно скромной. Изготовлением карт-«схем», чертежей ведал в Древней Руси Разрядный приказ. Они изготавливались для военных и дипломатических нужд. На Руси в то время, видимо, отсутствовали квалифицированные специалисты, так как, когда Иван Грозный (1533—1584) повелел изготовить общую карту царства, из этого ничего не вышло. Западу пришлось знакомиться с Россией по картам, созданным европейскими картографами. В 1516 г. Россию посетил посол императора Максимилиана Сигизмунд Гербенштейн. Он оставил записки о Московском государстве и карту, которая в 1546 г. была опубликована на Западе. Карта Московии англичанина Энтони Дженкинсона была опубликована в 1562 г. в Лондоне. В правление царя Бориса Годунова (1598—1605) уже без помощи иностранцев была составлена общая карта Московского государства, известная как «Большой чертеж». В этой карте была представлена Европейская часть России и Украина, а карта Сибири так и не была составлена, поскольку для нее не было необходимых материалов. В 1613 г. в руки амстердамского картографа Хессия Герритса попала подлинная рукописная карта России царевича Федора Годунова, которую он перенес в доработанном виде на медную печатную форму. Освоение Сибирских земель делало необходимым создание новых карт. Первую карту Сибири составил в 1667 г. тобольский воевода Петр Годунов. При царе Алексее Михайловиче активно шла

топографическая съемка, и Семен Ремизов подготовил большой атлас Сибири. При этом активно использовалась помощь иностранных специалистов. Так, голландский адмирал на русской службе Корнелий Крюйс издал атлас реки Дон.

Можно сделать вывод, что в начале XVIII в. российская картография сделала огромный скачок. Широкая, многогранная деятельность царя-преобразователя Петра Великого по развитию производительных сил страны, сухопутной и морской торговли дала развитие и российской геодезической науке. Этот государь с полным основанием считается создателем светского образования. Для него было особенно важным сформировать при помощи иностранцев национальные научные кадры. Во время Великого посольства (1697—1698) Петр I встречался с Готфридом Лейбницем, и тот посоветовал ему вести магнитные наблюдения, сделать точное описание страны, подготовить карты. К этому призывал царя и Яков Брюс. Он полагал, что «...за недостатком обстоятельной Российской географии и ландкарт... немалый государству вред приключается» [2]. Для воспроизведения оригинальных карт были наняты граверы-иностранцы — Адриан Шхонебек и Петер Пикард. Шхонебек по русским материалам выгравировал в 1701 г. карту Азовского моря.

Первых российских геодезистов воспитала созданная в 1701 г. Московская навигацкая школа. Так, в 1707 г. ее окончил известный геодезист Иван Кирилов. В 1705 г. в Москве была открыта Гражданская типография, которую возглавил Василий Киприанов. Он был не только гравером по меди и картографом, но и издателем. Ему была дарована привилегия установить в городе первый частный печатный станок. При типографии была создана библиотека, которая среди прочего должна была хранить иностранные атласы. Типография Киприанова работала под опекой знаменитого петровского вельможи Якова Вилимовича Брюса. Первой картой, отпечатанной в этой типографии, был план Иерусалима на двух листах. Затем последовала карта Каспийского моря. В 1713 г. Гражданская типография выпустила карту полушарий, в 1717 г. — карту мира, а в 1726 г. опубликовала «Альманах» Брюса на 36 листах, в который была включена карта Московской губернии и Ингерманландии.

В 1719 г. вся российская картография была отдана под начало первого русского директора картографического департамента Ивана Кирилова, который считал, что для составления карт съемку можно производить от рек и других географических объектов. Он начал работать над атласом России. Полный атлас должен был включать

120 карт, и первая его часть, состоявшая из общей карты и четырнадцати региональных карт, была опубликована в 1734 г. В нем была представлена первая и более или менее точная карта всей России. С этого момента все европейские картографы составляли свои карты России на основе работ русских специалистов.

Специальность «геодезии ученик» появилась в 1720 г., когда Петербургская Морская академия выпустила группу геодезистов. Кирилов приложил немало усилий для того, чтобы съемки местности проводились систематически. Кроме того, он подготовил первую инструкцию для геодезистов. Лео Багров в «Истории русской картографии» ссылается на важный указ Петра от 7 декабря 1720 г. [3]. В нем отмечалось, что геодезические ученики должны получать жалованье шесть рублей в месяц и что деньги для оплаты их работы должны поступать из фондов администрации тех районов, где они будут трудиться. Специально оговаривался вопрос о выдаче специальных наград за выдающиеся достижения. Несколькими днями позже Сенат издал декрет о том, что местные власти должны были оказывать всяческое содействие геодезистам — предоставлять на почтовых станциях лошадей, экипажи и сани. Губернаторам и воеводам предписывалось наблюдать за процессом составления карт и по мере готовности посылать эти карты в Сенат. В 1721 г. десять выпускников Морской академии отправились на места своей службы.

Петр Великий создал целый класс профессиональных топографов, которые были разосланы во все концы России, в том числе на Камчатку и Курильские острова. Особое внимание уделялось геодезической съемке побережья Балтийского и Каспийского морей, а также линии русско-шведской границы по Ништадтскому договору. Так, в Синодальной типографии в 1720—1723 гг. было отпечатано 100 карт Балтийского и 150 карт Каспийского моря. Следует особо отметить, что геодезическая наука имела большое прикладное значение. С 1700 по 1721 г. шла Северная война со Швецией, а в 1722—1723 гг. состоялся Персидский поход на берега Хвалынского (Каспийского) моря. Поэтому войскам нужны были подробные и достоверные географические карты.

Татищева сформировала бурная петровская эпоха. Как правильно заметил И. М. Шакинко, «Среди "Птенцов гнезда Петрова" Татищев — один из самых близких царю-преобразователю» [2]. Татищева сближала с царем идеология бескорыстного служения отечеству, ненасытная страсть к знаниям, желание при помощи науки освоить богатейшие природные богатства страны. Татищев родился

19 апреля 1686 г. в семье князей смоленских — потомков Владимира Мономаха. С 1704 г. он стал служить отечеству в драгунском полку. Принимал участие во многих кампаниях Северной войны, был ранен в Полтавской битве и обласкан государем: «Счастлив для меня тот день, когда на поле Полтавском я ранен был подле государя, который сам все распоряжал под ядрами и пулями, и когда по обыкновению своему он поцеловал меня в лоб, поздравляя раненым за отечество» [4]. Участвовал Татищев и в неудачном для русской армии Прутском походе 1711 г., в котором встретился с Яковом Брюсом — человеком высокого ума, острого рассуждения, твердой памяти, искусного в физике и математике. Эта встреча открыла Татищеву дорогу к более широким знаниям, познанию мира. Их объединяло стремление создать современную российскую географию.

Татищев открыл для себя философию рационализма. Он верил, что разум, наука — главное средство преобразования общества. В 1712 г. Татищев стал капитаном-артиллеристом и был отправлен за границу изучать инженерное дело. В Европе он собирает географические книги, карты, составляет проект посылки геодезистов в самые разные концы России. После возвращения из Европы Татищев сдает экзамен в присутствии царя. Его чертеж крепости был высоко оценен монархом. В 1719 г. Татищев подал царю записку «Как ландкарты и чертежи сочинять». В том же году Татищев был определен к землемерию всего государства и сочинению обстоятельной российской географии с картами. Эта задача была очень важной, так как без уравнивания и размежевания земель нельзя было правильно определить подушную подать. Задача по созданию обстоятельной российской географии оказалась для Татищева довольно трудной, но интересной. Видимо, сказывалось отсутствие достаточных знаний и финансирования.

Татищева привлекало создание географических карт еще и по следующей причине. Создание географических карт неразрывно связано было с историей. При составлении карт возникла проблема, требующая выяснить, каким образом те или иные территории вошли в состав Российского государства, какова история вошедших в него народов. В результате задача написания географии в глазах Татищева тесно переплеталась с необходимостью написания истории. В 1720 г. Татищев получил назначение на Урал. В то время на Урале работали два геодезиста, Чичагов и Лихарев, и, по-видимому, Татищев общался с ними. Очень скоро он понял, чтобы изменить что-то в судьбе Урала, нужно его хорошо знать. Будучи в Тобольске, Татищев

снимает копию с ремезовской карты Урала и Сибири, рассылает из Уктуса во все концы Урала геодезистов для составления новых карт. В это же время Татищев замышляет написать труд по этнографии и географии Сибири. Планам Татищева по составлению географических карт, несомненно, препятствовала частая смена мест службы. Так, в 1724 г. его послали в Швецию для выяснения вопросов, связанных с добычей уральских руд и устройством шахт. Будучи в Швеции, он заинтересовался состоянием картографических работ в этой стране. Особенно его интересовали карты Прибалтики, которые обошлись шведскому королю в несколько сот тысяч рублей.

В 1734 г. он снова побывал на Урале, на этот раз как управляющий шахтами Сибири и Пермской губернии. Сразу же по прибытии на Урал Татищев рассылает по городам Сибири вопросник, которым было 92 вопроса по историческим, географическим и этнографическим проблемам. Вопросы требовали также упоминания фактов находки разных руд и минералов. В своем донесении в Академию наук Татищев пишет о своем решении переделать неправильные карты Пермской, Вятской и Угорской земель. Прибывшим геодезистам он приказал вновь описать и обмерить территорию. Василий Шишков и Парфен Сомов были посланы в Томскую и Кузнецкую провинции, а Иван Шишков — в Тобольскую провинцию. В 1737 г. Татищев был назначен главным командиром Оренбургской экспедиции (1737—1739). Свою задачу он видел в поиске и освоении природных богатств, установлении торговых контактов со Средней Азией. В составе экспедиции находились и геодезисты. Татищев добился, чтобы ему подчинили всех геодезистов, работающих на востоке страны. Татищев просил Академию наук, в частности Делиля, написать подробную инструкцию для геодезистов. Она должна была включать подробное руководство по определению долготы и широты, таблицы магнитных отклонений, а также советы, как чертить карты на бумаге и как проводить границы земельных владений на местности. Кроме того, Татищев беспокоился о том, чтобы геодезисты вовремя бы получали нужные инструменты. В 1741—1745 гг. Татищев исполнял обязанности губернатора Астраханской губернии. Из Царицына он посылает геодезистам приказы о составлении новых карт. Были составлены карты нижнего течения Волги. В 1745 г. Академия наук прислала ему только что опубликованный атлас. После тщательного изучения атласа Татищев послал свои замечания. Они свидетельствовали о том, что Татищев хорошо знал географию России, причем не только те области, которыми он управлял, но и те, в

которых не служил. Лео Багров отмечал: «Татищев прилагал много усилий, чтобы хорошо узнать области, которыми он управлял, и изучить географию России. В своих предложениях по составлению книг по русской истории и географии он писал, что каждый губернатор должен составить описание и карту вверенной ему губернии» [3]. Последние четыре года жизни Татищев прожил в своем подмосковном имении Болдино, где и умер 15 июля 1750 г.

Государственный интерес и в делах, и помыслах Татищева неуклонно стоял на первом месте. В «Разговоре двух приятелей о пользе наук и училищ» он отмечал, что географию, или землеописание и геодезию как науки, важные для пользы государства, нужно поддерживать на государственном уровне, так как никакой частный предприниматель не способен организовать картографические работы в масштабе всей страны.

### Список литературы

1. *Павленков Ф.* Энциклопедический словарь Ф. Павленкова. СПб., 1913.
2. *Шажинко И. М.* Василий Татищев. Свердловск, 1986.
3. *Багров Л.* История русской картографии. М., 2005.
4. *Кузьмин А. Г.* Татищев. М., 1987.

## Поэтические страницы

**И. Л. Андронов**

«Оптимист уверен, что все звезды — двойные.  
Пессимист же считает, что только 80 %»  
*А. А. Боярчук*

«И стало всем давно понятно:  
По звездам тоже бродят пятна.  
Так буйство звездных катаклизмов  
Приводит к сбою синхронизма.»  
*Ю. С. Ефимов*

\*\*\*

«Двойных систем — сто два процента», —  
Мне новостей сказала лента.  
И, полость Роша заполняя,  
В контакт они тогда вступают.

Потом через Лагранжа точку  
(Слегка рифмуя эту строчку)  
Течет все плазма в облаках  
И отражается в стихах.

И тут вопрос — пятно? Струя?  
Ударно что вдруг в диск вошла?  
Ведь рассчитать кривые блеска  
Нам не успеть, и нету места.

Но все же горб там яркий есть.  
И знать, моделей нам не счесть.  
Кому нужна звезда с горбами?  
Конечно же, нам только с вами.

Прецессию такой «жираф»,  
Всем людям ярко показав,  
Привлек внимание CCD  
И астрономов на пути.

Но белый карлик может поле,  
Вполне дипольное на воле,  
Довольно сильное иметь  
И диск разрушить там суметь.

Аккреционные колонны  
Заряд имеют ноль кулонов,  
Но излучают циклотрон  
(С поляризациею он).

Его мы в КраО изучаем  
И звезд других не замечаем.  
Шум дробовой летит впотьмах,  
Волне ударной скажет «бах!»

Магнитный цикл им свыше дан,  
А в бурю жить пришлось всем нам,  
Потоки плазмы модуляций  
Приводят к сотням публикаций.

Момент уносят гравиволны,  
Магнитный ветер.  
Но неполно Я бы картину описал,  
Коль Новой вспышку не назвал.

Она, коль вспыхнула строптиво,  
На небе выглядит как диво.  
И термоядерный заряд  
Рвет оболочку невпопад.

И нету больше синхронизма,  
И спектр дает большая призма.  
И пара лет потом пройдет,  
Пока туман с нее сойдет.

А тут поток аккреционный,  
И центробежной силы полный  
Баланс моменту сотворит  
За сотню лет, что в звездах миг.

Кружится карлик, и орбита  
Вся наблюдателю открыта.  
И их период бития  
Отнаблюдать хотел бы я.

Но все ж пора кончать, коллеги.  
Проснуться следует от неги.  
А то в период бития  
Могу попасть случайно я.

И, коль бокалы не пустые,  
Поднимем, други дорогие!  
За здоровье выпьем мы до дна,  
Науке слава что б была!

*12.09.2005*

**Т. И. Левитская**

РАЗМЫШЛЕНИЕ

Действительно, как странно мы живем.  
Не то любовь, не то простая жалость?  
Ты от меня уходишь день за днем.  
И мне не удержать тебя, пожалуй...

Но, все еще не веря, что всерьез,  
Оттягиваю я приход событий.  
Хоть наша жизнь как перетертый трос,  
И в нем осталось две-три нити...

Н. Б. Железнов

## Дубовый зал, Владимирский дворец

Песня посвящается студенткам класса преподавателя Санкт-Петербургской государственной Консерватории, заслуженной артистки России, профессора Тамары Дмитриевны Новиченко.

Среди картин в дворцовом оформлении,  
На сцене у камина, скажем так,  
Звучала музыка и ласковое пенье,  
Старинный разгоня полумрак.  
Семь девушек, одна другой прекрасней,  
По очереди в отведенный срок  
В волненьи легком, и в порыве страсти  
Вокальный выполняли свой урок.

*Припев:*

Промчатся годы, как одно мгновенье,  
И вот на сцене среди оперных певиц,  
В лучах софитов, в свете вдохновенья  
Узнаем несколько знакомых милых лиц.  
Их ждут Большой, Мариинка и Ла Скала,  
Пленят легко они там тысячи сердец.  
Но может, вспомнится им в миг великой славы  
Дубовый зал, Владимирский дворец.

Бывают в жизни странные явления  
Удача это, или свыше знак?  
Концерт хороший, в этом нет сомнений,  
Но было чувство — что-то тут не так!  
Семь девушек — все будущие дивы,  
Сирены самых сказочных морей!  
Все было так чудесно и красиво:  
Для маленькой лишь горсточка людей.

---

© Н. Б. Железнов, 2006

*Приве:*

Промчатся годы, как одно мгновенье,  
И вот на сцене среди оперных певиц,  
В лучах софитов, в свете вдохновенья  
Узнаем несколько знакомых милых лиц.  
Их ждут Большой, Мариинка и Ла Скала,  
Пленят легко они там тысячи сердец:  
Но вспомнится концерт, где было нас так мало,  
Дубовый зал, Владимирский дворец.

*Примечание.*

Владимирский дворец — дворец Великого князя Владимира Александровича Романова, сына Александра II (Дворцовая набережная, 26, недалеко от Эрмитажа). Этот дворец известен еще как Дом ученых им. М.Горького.

## Список участников

---

ФИО	Организация	e-mail
Аввакумова Е. А.	УрГУ	e.snegireva@mail.ru
Алексеев И. Ю.	НИИ КрАО	ilya@crao.crimea.ua
Алексеев С. О.	ГАИШ МГУ	alexeyev@sai.msu.ru
Анфилов В. Н.	Имин УрО РАН	Iminchf@ilmeny.ac.ru
Балега Ю. Ю.	САО РАН	balega@sao.ru
Балуев Р. В.	СПбГУ	m01brv@star.math.spbu.ru
Баньщикова М. А.	НИИ ПММ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Берланд В. Э.	УрГУ	valeria.berland@usu.ru
Бикмаев И. Ф.	КазГУ	Nelli.Shimanskya@ksu.ru
Бисикало Д. В.	ИНАСАН	bisikalo@inasan.ru
Блинов Д. А.	СПбГУ	gellir@mail.ru
Богатырев В. В.	ИНАСАН	victor@inasan.ru
Борисов Д. Н.	ИНАСАН	borisov@inasan.ru
Бочанцев В. В.	УрГУ	3730630@mail.ru
Бургин М. С.	АКЦ ФИАН	mburgin@asc.rssi.ru
Бызов И. Л.	УрГУ	byzov17@mail.ru
Васюнин А. И.	УрГУ	Anton.Vasyunin@usu.ru
Вибе Д. З.	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Ю. З.	УрГУ	Yuliya.Wiebe@usu.ru
Волосатов А. А.	СПбГУ ПМ-ПУ	akte0n@mail.ru
Воронков М. А.	ATNF CSIRO	Maxim.Voronkov@csiro.au
Генералова Н. А.	МПУ	nadine@msx.ru
Гламазда Д. В.	УрГУ	Dmitriy.Glamazda@usu.ru
Голенищева О. К.	ЧелГУ	lefka10@mail.ru
Горбанев Ю. М.	АО ОНУ	skydust@tm.odessa.ua
Горда С. Ю.	АО УрГУ	Stanislav.Gorda@usu.ru

ФИО	Организация	e-mail
Грачев В. Г.	ИНАСАН	grachev2004@mail.ru
Дремов В. В.	РФЯЦ-ВНИИТФ	V.V.Dryomov@vniitf.ru
Дремова Г. Н.	РФЯЦ-ВНИИТФ	g.n.dryomova@mail.ru
Дубас О. М.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Ерёмин А. С.	СПбГУ ПМПУ	ereminh@rambler.ru
Есина Я. В.	ВолГУ	nkuzmin@list.ru
Железнов Н. Б.	ИПА РАН	znb@ipa.nw.ru
Жилкин А. Г.	ИНАСАН	zhilkin@inasan.ru
Жуков А. О.	ИНАСАН	grachev2004@mail.ru
Заложных И. С.	УрГУ	3730630@mail.ru
Захарова П. Е.	УрГУ	Polina.Zakharova@usu.ru
Зинченко И. И.	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Зубарева А. М.	КГУ	zam_01@rambler.ru
Иванов К. А.	ИНАСАН	grachev2004@mail.ru
Иванова А. В.	ГАО НАНУ	sandra@mao.kiev.ua
Казанцев М. Б.	ЧелГУ	
Кайгородов П. В.	ИНАСАН	pasha@inasan.ru
Калинин А. А.	УрГУ	Aleksandr.Kalinin@usu.ru
Калинина Н. Д.	АО УрГУ	Nataliya.Kalinina@usu.ru
Кара И. В.	ОНУ	creator@sky.od.ua
Карташова А. П.	ИНАСАН	akartashova@inasan.ru
Кауц В. Л.	АКЦ ФИАН	kauts@lukash.asc.rssi.ru
Кирсанова М. С.	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Клочкова В. Г.	САО РАН	valenta@sao.ru
Кожевников В. П.	УрГУ	valerij.kozhevnikov@usu.ru
Кожевникова А. В.	УрГУ	Kozhevnikova-a@yandex.ru
Комарова П. К.	УрГУ	Polina@mail.ru
Конева В. Ю.	УрГУ	eledhim@yandex.ru
Кононенко А. М.	ЧелГУ	lexssystem@rambler.ru
Кононов Д. А.	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Коржавин С. А.	ОНУ	creator@sky.od.ua

ФИО	Организация	e-mail
Коробцев И.	ИГУ	
Костогрыз Н. М.	ГАО НАНУ	kosn@mao.kiev.ua
Крушинский В. В.	УрГУ	krussh@rambler.ru
Кузнецов Э. Д.	УрГУ	Eduard.Kuznetsov@usu.ru
Кузьмин Н. М.	ВолГУ	nkuzmin@list.ru
Курбатов Е. П.	ИНАСАН	kurbatov@inasan.ru
Лаунхардт Р.	МПИА	rl@mpia.de
Лебедев А. А.	ГАИШ	lebedev@xray.sai.msu.ru
Левитская Т. И.	УрГУ	tatyana.levitskaya@usu.ru
Мальшев А. В.	УрГУ	alexey.malyshev@usu.ru
Мальшев А. И.	ИГТ УрО РАН	malyshev@igg.uran.ru
Мальшева Л. К.	АО УрГУ	LK-Malysheva@yandex.ru
Мананников А. Л.	ГАИШ	pupkin0007@mail.ru
Маслов И. А.	ИКИ РАН	imaslov@iki.rssi.ru
Мионов А. В.	ГАИШ МГУ	almir@sai.msu.ru
Муцевой В. В.	ВолГУ	nkuzmin@list.ru
Насонов Д. С.	ГАИШ МГУ	gvardopo4ta@gmail.com
Начапкин М. Н.	РГППУ	Livitskaya.Tatyana@usu.ru
Никитина Н. Ю.	КГУ	nas@ksu.ru
Никитонов Ю. А.	УрГУ	nik_yu@mail.ru
Никифорова Т. П.	УрГУ	tatyana.nikiforova@usu.ru
Орлов В. В.	НИАИ СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Орлов С. А.	НИАИ СПбГУ	sergei@so3281.spb.edu
Островский А. Б.	УрГУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Павлюченков Я. Н.	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Панкратова Н. В.	УрГУ	silver-star@yandex.ru
Панчук В. Е.	САО РАН	panchuk@sao.ru
Перевозкина Е. Л.	МОПО СО	perevozkina@minobraz.ru
Польченко А. С.	ТГУ	bat@niipmm.tsu.ru

ФИО	Организация	e-mail
Поляков А. М.	УрГУ	coi@bk.ru
Попов А. А.	УрГУ	krussh@rambler.ru
Попова М. Э.	УрГУ	Maria.Popova@usu.ru
Ромашин Г. С.	УрГУ	georgij.romashin@usu.ru
Рубинов А. В.	СПбГУ	rav@astro.spbu.ru
Салий С. В.	АО УрГУ	Svetlana.Salii@usu.ru
Самылова Е. В.	УрГУ	Katya@mail.ru
Саркисян А.	САО РАН	ars@sao.ru
Сафонов Б. С.	ГАИШ МГУ	safonov@sai.msu.ru
Сахибуллин Н. А.	КазГУ	Nelli.Shimanskya@ksu.ru
Свечников М. А.	УрГУ	g.n.dryomova@mail.ru
Свечников М. А.	УрГУ	Marij.Svechnikov@usu.ru
Селезнев А. Ф.	АО УрГУ	anton@dt.ru
Семенюк А. И.	ВолГУ	sasha_semenuk@mail.ru
Смирнов А. А.	СПбГУ	l_smirnoff@mail.ru
Соболев А. М.	АО УрГУ	Andrey.Sobolev@usu.ru
Соколовский К. В.	ГАИШ	idkfa@sai.msu.ru
Соловьев А. А.	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Старенькая Е. А.	УрГУ	Lena@mail.ru
Степанищев А. С.	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Стеценко Д. В.	КГУ	stvden@yandex.ru
Стрижова Д. А.	УрГУ	Dasha@mail.ru
Струнина Т. В.	УрГУ	rigel7@yandex.ru
Сытов А. Ю.	ИНАСАН	sytov@inasan.ru
Тагирова Ю. Ф.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Титов Д. Л.	УрГУ	mityamityamitya@hotmail.com
Токовенко А. А.	ОНУ	creator@sky.od.ua
Туева О. Н.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Турлов З. Н.	ИНАСАН	alexturlov@yandex.ru
Тутуков А. В.	ИНАСАН	atutukov@inasan.rssi.ru
Угольников О. С.	ИКИ РАН	ugol@tanatos.asc.rssi.ru

ФИО	Организация	e-mail
Финкельштейн А. М.	ИПА РАН	amf@ipa.nw.ru
Харламов Г. Ю.	ИНАСАН	charlgu@inasan.ru
Хачай Ю. В.	ИГФ УрО РАН	yu.khachay@r66.ru
Хеннинг Т.	МПИА	henning@mpia.de
Холшевников К. В.	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Храпов С. С.	ВолГУ	xss@vlink.ru
Цивилев А. П.	ПРАО	tsivilev@prao.psn.ru
Челянов А. Р.	ИНАСАН	albert@inasan.ru
Ченцов Е. Л.	САО РАН	echen@sao.ru
Чувашов И. Н.	ТГУ	bat@niipmm.tsu.ru
Чурюмов К. И.	АО КНУ	klim.churyumov@observ.univ.kiev.ua
Шагабутдинов А. И.	УрГУ	obser@uraltc.ru
Шагинян А. С.	РГУ	ashaginyan@rambler.ru
Шайдулин В. Ш.	УрГУ	shvak@yandex.ru
Шихворостова Н. Н.	АКЦ ФИАН	nadya_sh@mail.ru
Шелемей О. В.	УрГУ	oksana.shelemei@mail.ru
Шиманская Н. Н.	КазГУ	Nelli.Shimanskya@ksu.ru
Шиманский В. В.	КГУ	Slava.Shimansky@ksu.ru
Шустов Б. М.	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Эбель М. А.	ЧелГУ	ebelma@mail.ru
Юшкин М. В.	САО РАН	maks@sao.ru
Gaylard M.	HartRAO	mike@hartrao.ac.za
Goedhart S.	HartRAO	sharmila@hartrao.ac.za
Johansson L. E.	OSO	leb@oso.chalmers.se
Thomasson M.	OSO	magnus@oso.chalmers.se
van der Walt J.	NWU	fskdjvdw@puknet.puk.ac.za

## Содержание

<b>Программа конференции</b>	<b>5</b>
<b>Обзорные лекции</b>	<b>20</b>
Алексеев С. О. Современные расширения общей теории относительности . . . . .	20
Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В. Возможный вариант дифференциации вещества на этапе аккумуляции Земли . . . . .	32
Вибе Д. Э. Откуда берутся звезды . . . . .	40
Есина Я. В., Кузьмин Н. М., Мусцовой В. В., Храпов С. С. Эффект Россби и проблема солнечной активности . . . . .	51
Железнов Н. Б. Астероиды, сближающиеся с Землей . . . . .	63
Зинченко И. И. Физико-химическая структура областей образования массивных звезд . . . . .	79
Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Юшкин М. В. Спектроскопия звезд на 6-метровом телескопе БТА . . . . .	89
Мальшев А. И., Мальшева Л. К. Условия возникновения предбиологических состояний на планетах солнечной системы . . . . .	95
Миронов А. В. Уроки классиков. Из истории развития астрофотометрии в России и СССР . . . . .	115
Орлов В. В., Рубинов А. В. Модели Галактики: абстракция и реальность . . . . .	127
Санько Н. Ф., Шустов Б. М. Российская программа фундаментальных космических исследований . . . . .	137
Соболев А. М., Островский А. Б., Кирсанова М. С., Шелемей О. В., Воронков М. А., Мальшев А. В. Метанольные мазеры и процессы звездообразования . . . . .	150
Соловьев А. А. Сейсмология солнечных пятен . . . . .	160
Угольников О. С. Поляризационные исследования атмосферы Земли . . . . .	176
Холшевников К. В. Пространства кеплеровских орбит . . . . .	187
Чурюмов К. И. Космические миссии к ядрам комет — от Вег до Розетты . . . . .	198
Шустов Б. М. Обсерватория в Терсколе: настоящее и будущее . . . . .	210

**Шиманский В. В., Бикмаев И. Ф., Сахибуллин Н. А., Шиманская Н. Н., Борисов Н. В., Позднякова С. А.** Результаты исследований тесных двойных систем по наблюдениям на БТА САО и РТТ КГУ . . . 211

**Тезисы студенческих докладов 215**

<b>Балуев Р. В.</b> Освобождение статистики внесолнечных планет от эффектов наблюдательной селекции . . . . .	215
<b>Блинов Д. А.</b> Статистические закономерности распределения орбитальных параметров и физических характеристик астероидов . . . . .	216
<b>Бызов И. Л.</b> Особенности обработки ПЗС изображений рассеянных звездных скоплений камеры SBG . . . . .	217
<b>Волосатов А. А.</b> Роль смягчающего параметра в гравитационном потенциале и напряженности спиральной нити . . . . .	218
<b>Дубас О. М.</b> Применение метода наименьших квадратов в задаче построения областей возможных движений астероидов . . . . .	219
<b>Ерёмин А. С.</b> Примеры моделирования гравитирующих тел методом суперпозиции дисков . . . . .	220
<b>Зубарева А. М.</b> Фотометрическое исследование поляра RXJ1846.9+5538 . . . . .	221
<b>Кара И. В.</b> Интегрирование дифференциальных уравнений движения небесных тел методом Рунге—Кутты 10-го порядка . . . . .	222
<b>Конева В. Ю., Горда С. Ю.</b> Параметры видимой относительной орбиты третьего тела в системе SZ Cam . . .	223
<b>Кононенко А. М.</b> Токовые слои и рентгеновское излучение в магнитосферах молодых звезд . . . . .	224
<b>Коржавин С. А.</b> Сравнительная обработка наблюдений искусственных спутников Земли . . . . .	225
<b>Коробцев И. В.</b> Фотометр ИК-диапазона для астрономических наблюдений . . . . .	226
<b>Никитина Н. Ю.</b> Работа студентов-геодезистов на объектах города Казани . . . . .	227
<b>Польченко А. С.</b> Способ улучшения орбит по смешанным рядам наблюдений . . . . .	228
<b>Попов А. А., Бызов И. Л., Крушинский В. В., Заложных И. С.</b> Телескоп учебной обсерватории УрГУ	229

<b>Семенюк А. И.</b> Моделирование излучающих узлов джетов из молодых звезд . . . . .	230
<b>Смирнов А. А.</b> Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Types с данными каталога Hipparcos . . . . .	231
<b>Соколовский К. В., Назаров С. Л., Лебедев А. А., Насонов Д. С.</b> Полуавтоматический поиск переменных объектов на серии ПЗС снимков . . . . .	232
<b>Степанищев А. С.</b> Определение кинематических параметров звезд в окрестности Солнца . . . . .	233
<b>Стеценко Д. В.</b> Написание программного комплекса для астрометрических наблюдений и его применение . . . . .	234
<b>Тагирова Ю. Ф.</b> Исследование эффективности симметрических интеграторов для решения задач астероидной динамики . . . . .	235
<b>Туева О. Н.</b> Численное исследование влияния радиационных сил на динамику фрагментов космического мусора . . . . .	236
<b>Чувашов И. Н.</b> Упрощенный способ определения начального приближения при улучшении орбит . . . . .	237
<b>Шагинян А. С.</b> Радиационный вынос пыли из карликовых галактик при больших красных смещениях . . . . .	238
<b>Шайдулин В. Ш.</b> Оценка вероятности столкновения объекта с частицами облака мусора в области геостационарных орбит околоземного пространства . . . . .	239
<b>Шелемей О. В., Кирсанова М. С., Поляков А. М., Панкратова Н. В., Соболев А. М., Цивилев А. П.</b> Наблюдения линий NH <sub>3</sub> в областях массивного звездообразования рукава Персея на 22-метровом телескопе ПРАО ФИАН . . . . .	240
<b>Тезисы кратких сообщений</b>	<b>241</b>
<b>Аввакумова Е. А.</b> Анализ результатов синтеза кривых блеска массивных тесных двойных систем . . . . .	241
<b>Баньщикова М. А.</b> Моделирование областей возможных движений спутников Юпитера . . . . .	242
<b>Васюнин А. И., Соболев А. М.</b> Стохастическое моделирование химической эволюции МЗС с учетом газопылевого взаимодействия . . . . .	243

<b>Грачев В. Г., Иванов К. А., Турлов З. Н.</b> Исследование показателей эффективности метода стандартизации телевизионных фотометрических реализаций . . .	244
<b>Дремова Г. Н., Свечников М. А.</b> Сравнительный анализ «точных» и «приближенных» методов оценки абсолютных и относительных элементов разделенных и предконтактных тесных двойных систем . . . . .	245
<b>Кайгородов П. В., Бисикало Д. В., Кононов Д. А.</b> О возможном механизме рентгеновского излучения Ве/Х звезд . . . . .	246
<b>Карташова А. П., Горбанев Ю. М.</b> Результаты обработки и наблюдений метеорных потоков с использованием телевизионных оптико-электронных систем . . . . .	247
<b>Кирсанова М. С., Соболев А. М., Johansson L. E., Thomasson M.</b> Исследование областей массивного звездообразования в спиральном рукаве Персея . . . . .	248
<b>Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Ченцов Е. Л., Юшкин М. В.</b> К проблеме эволюционного статуса QYSge	249
<b>Кожевникова А. В., Алексеев И. Ю., Свечников М. А.</b> Особенности пятенной активности избранных двойных звезд поздних спектральных классов . . . . .	250
<b>Костогрыз Н. М.</b> Оптические параметры неизотермичной атмосферы Урана по данным об интенсивностях деталей комбинационного рассеяния . . . . .	251
<b>Курбатов Е. П.</b> Модель химико-динамической эволюции галактик . . . . .	252
<b>Никитинова Ю. А.</b> Археoaстрономия: проблемы становления и развития . . . . .	253
<b>Орлов С. А.</b> Структура облака частиц, образованного взрывом на орбите . . . . .	254
<b>Попова М. Э.</b> Анализ распределения молодых звездных объектов в плоскости Галактики с применением вейвлет-сглаживания . . . . .	255
<b>Салий С. В., Соболев А. М.</b> База данных для оценки физических параметров молекулярных облаков по интенсивностям радиолиний метанола . . . . .	256
<b>Сытов А. Ю., Жилкин А. Г.</b> Параллельный AMR-код для моделирования многомерных самогравитирующих МГД-течений . . . . .	257
<b>Токовенко А. А.</b> Модель Солнечной системы . . . . .	258

<b>Турлов З. Н., Грачев В. Г., Иванов К. А.</b> Алгоритм определения спектральных коэффициентов отражения материалов покрытий КА . . . . .	259
<b>Тутуков А. В., Дремов В. В., Дремова Г. Н.</b> Динамическая эволюция скоплений галактик в рамках задачи N тел. Образование сверхмассивных cD-галактик . . . . .	260
<b>Угольников О. С., Маслов И. А.</b> Дистанционное зондирование атмосферы на основе фотометрии лунных затмений . . . . .	261
<b>Челянов А. Р., Харламов Г. Ю.</b> Алгоритм обработки измерений в узкопольных оптико-электронных средствах наблюдения низкоорбитальных космических объектов . . . . .	262
<b>Чурюмов К. И.</b> Sizes of an artificial crater on the surface of the comet 9P/Tempel . . . . .	263
<b>Шахворостова Н. Н., Бургин М. С., Кауц В. Л.</b> О влиянии ударных переходов на космологический комбинационный спектр водорода . . . . .	264
<b>Стендовые доклады</b>	<b>265</b>
<b>Goedhart S., Соболев А. М., Островский А. Б., van der Walt J., Gaylard M.</b> Variability of Class II methanol masers . . . . .	265
<b>Берланд В. Э.</b> Поиск алгоритма определения минимального расстояния между двумя кеплеровскими орбитами средствами символьной алгебры . . . . .	266
<b>Вибе Д. Э., Павлюченков Я. Н., Лаунхардт Р., Хеннинг Т.</b> Химическая история дозвездного ядра CB17 . . . . .	267
<b>Горда С. Ю.</b> Оценки расстояния до SZ Сам и массы третьего тела . . . . .	268
<b>Захарова П. Е., Кузнецов Э. Д., Гламазда Д. В.</b> Анализ результатов наблюдений геосинхронных спутников в окрестности устойчивой точки либрации . . . . .	269
<b>Калинин А. А., Крушинский В. В., Шагабутдинов А. И.</b> Спектрофотометрия солнечных активных образований на солнечном телескопе АЦУ-5 АО УрГУ с помощью ПЗС-матрицы SXV-H9 StarlightXPress . . . . .	270
<b>Калинина Н. Д.</b> Вращательные температуры и лучевые концентрации молекул $\text{CH}_3\text{CN}$ и $\text{CH}_3\text{OH}$ в ядре W3(OH) . . . . .	271

<b>Кожевников В. П.</b> Обнаружение когерентных колебаний блеска с периодом 3.353 ч в сверхмягком рентгенов- ском источнике RX J0019.8+2156 (QR And) . . . . .	272
<b>Крушинский В. В., Заложных И. С.</b> Преобразователи фокусного расстояния телескопа Кассегрена . . . . .	273
<b>Кузнецов Э. Д.</b> Об эволюции эксцентриситета геосинхрон- ной орбиты критического наклона . . . . .	274
<b>Никифорова Т. П., Поляков А. М., Панкратова Н. В., Струнина Т. В.</b> Некоторые оптические проявления рентгеновской солнечной вспышки 13 июля 2005 г. . . . .	275
<b>Островский А. Б., Соболев А. М., Воронков М. А.</b> Режимы накачки метанольных мазеров I класса . . . . .	276
<b>Перевозкина Е. Л.</b> Анализ возрастов маломассивных РГП- систем . . . . .	277
<b>Перевозкина Е. Л.</b> Планета по имени Бахчиванджи . . . . .	278
<b>Ромашин Г. С.</b> Российская группировка геостационарных спутников . . . . .	279
<b>Салий С. В., Соболев А. М.</b> Зависимость оценок физиче- ских параметров областей массивного звездообразо- вания от выбора модели . . . . .	280
<b>Шахворостова Н. Н.</b> О кинетике космологической реком- бинации водорода . . . . .	281
<b>Эбель М. А.</b> Оценка вероятности открытия КР-систем как затменных переменных для случая полного потемне- ния диска звезды к краю . . . . .	282
<b>Из истории науки</b>	<b>284</b>
<b>Левитская Т. И.</b> Феодосий Николаевич Красовский и ре- ференц-эллипсоид его имени . . . . .	284
<b>Начапкин М. Н.</b> Роль В. Н. Татищева в развитии россий- ской картографии . . . . .	289
<b>Поэтические страницы</b>	<b>295</b>
<b>Андронов И. Л.</b> «Двойных систем — сто два процента»... . . . .	296
<b>Левитская Т. И.</b> Размышление . . . . .	299
<b>Железнов Н. Б.</b> Дубовый зал, Владимирский дворец . . . . .	300
<b>Список участников</b>	<b>302</b>

Научное издание

**Физика Космоса**

Труды 35-й Международной  
студенческой научной конференции  
Екатеринбург, Россия,  
30 января — 3 февраля 2006 г.

Редактор Т. А. Федорова  
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 23.01.06. Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 19,0. Усл. печ. л. 18,14.  
Тираж 150 экз. Заказ .

Издательство Уральского университета.  
620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.  
Отпечатано в ООО «ИРА УТК».  
620219, Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, 42.