

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Столкновения комет с планетами играют важную роль в эволюции Солнечной системы. Например, многие факты свидетельствуют о том, что 65 млн. лет назад произошло столкновение Земли с кометой, в результате которого погибли динозавры. В июле 1994 года впервые за исторический период времени произошло столкновение кометы с планетой: 21 фрагмент кометы Шумейкеров-Леви 9 столкнулся с Юпитером. За процессом столкновения наблюдали практически все крупные обсерватории мира. Было зарегистрировано излучение молекул, некоторые из которых не были обнаружены в атмосфере Юпитера до столкновения с кометой. В данной работе проведено исследование физико-химических процессов во время столкновения кометы с Юпитером. Рассмотрение этого вопроса особенно важно для решения проблемы химической эволюции атмосфер планет-гигантов.

Также проведено исследование возможных последствий столкновений комет с Луной. Следы таких столкновений, вероятно, являются диффузные структуры, выделяющиеся на лунной поверхности по фотометрическим и магнитным свойствам. Так как кометные ядра богаты летучими компонентами, в основном, водой, то некоторая часть воды и других летучих соединений кометного происхождения может сохраняться в зонах вечной тени на полюсах Луны после столкновения комет с Луной. Изучение полярных льдов на Луне важно для понимания природы сталкивающихся с Луной небесных тел. Кроме того, летучие соединения могут быть использованы в качестве топлива в процессе функционирования будущей лунной базы.

Цель работы Целью настоящей работы является исследование физико-химических процессов при столкновении комет с телами Солнечной системы. Рассмотрено два варианта таких столкновений: столкновение кометы с Луной, не обладающей атмосферой, и столкновение кометы с Юпитером.

При выполнении работы были поставлены следующие задачи:

определение элементного состава возмущенной области атмосферы Юпитера во время столкновения с кометой с целью изучения гидродинамических аспектов столкновения;

определение на основании данных по концентрациям молекул в возмущенной области атмосферы Юпитера параметров закалки химического состава газа;

исследование химического состава ударно-образованной лунной атмосферой кометного происхождения;

решение вопроса сохранения летучих кометного происхождения в полярных регионах Луны;

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации - страниц, в ней содержится рисунков. Список литературы насчитывает наименований.

Во введении дается краткое описание проблем, затронутых в диссертации, ставятся цели и обосновывается актуальность данной работы.

1. В первой главе дан краткий обзор наблюдений падения кометы Шумейкеров-Леви 9 на Юпитер, наиболее детально рассматриваются наблюдения молекул в местах падения крупных фрагментов кометы Шумейкеров-Леви 9 [1, 2]. Кратко освещается механизм разрушения кометных фрагментов в юпитерианской атмосфере. Приведены оценки высот взрывов кометных фрагментов [3], рассматриваются гидродинамические процессы, протекавшие в возмущенной падением кометы атмосферой Юпитера. Дан критический анализ работ [4, 5], в которых освещаются химические процессы в возмущенной атмосфере планеты-гиганта.

2. Во второй главе рассмотрены результаты расчетов равновесного химического состава расширяющегося огненного шара при различных начальных температурах и давлениях, элементном составе огненного шара.

Максимальная температура в местах падения кометных фрагментов составила несколько десятков тысяч градусов, поэтому атмосфера Юпитера в местах падения

кометных фрагментов представляла собой ионизованную плазму. При охлаждении огненного шара до температуры порядка 5000 К произошло образование молекул. Характерное время протекания химических процессов сначала было значительно меньше характерного времени охлаждения огненного шара, поэтому химический состав огненного шара соответствовал равновесному. Когда характерное время химических процессов совпало с характерным временем охлаждения, наступила закалка химического состава возмущенной области и в дальнейшем относительные концентрации молекул перестали изменяться, соответствуя равновесным во время закаливания. Так как равновесный химический состав газовой смеси чувствителен к параметрам закаливания, то мы можем, используя наблюдательные данные по относительным концентрациям молекул, решить обратную задачу - оценить температуру, давление и элементный состав огненного шара во время закаливания. Используя найденные параметры закаливания, анализируются различные гипотезы происхождения наблюдавшихся молекул. По данным по элементному составу возмущенной области во время закаливания, изучается механизм смешения кометного и планетного вещества в местах падения кометных фрагментов. По содержанию наблюдавшихся соединений также оценивается глубина проникновения кометных фрагментов в атмосферу планеты и размеры кометных фрагментов.

3. В третьей главе дан обзор имеющихся в литературе данных по проблеме столкновения комет с Луной. Приведены оценки частоты столкновений комет с Луной в настоящее время и на ранних стадиях существования Солнечной системы. Излагаются наблюдательные данные, косвенно подтверждающие гипотезу кометных ливней, согласно которой около 10 млн. лет назад с Луной столкнулось несколько комет [6]. Дан обзор современных представлений физики высокоскоростного удара кометы по безатмосферному телу. Приводятся расчеты средних скоростей столкновения долгопериодических и короткопериодических комет с Луной. Также рассмотрены основные гипотезы химического состава кометных ядер. Освещены результаты исследования летучих соединений в образцах лунного грунта, возвращенных на Землю по программе "Аполлон". Приведен обзор работ по

основным источникам летучих (солнечный ветер, кометные удары, микрометеоритная бомбардировка, дегазация лунных недр) в холодных ловушках на полюсах Луны [7, 8]. Приводятся данные работ по изучению температурного режима в полярных регионах Луны. Также рассматриваются результаты исследований полярных регионов Луны с помощью американских аппаратов "Клементина" [9] и "Лунар проспектор" [10], которые подтвердили наличие воды на Луне.

4. В четвертой части моделируется падение кометы на Луну. Вначале оценивается возможность сохранения кометного вещества на Луне после столкновения кометы с Луной. Рассчитывается равновесный химический состав охлаждающегося огненного шара, состоящего из смеси лунного и кометного вещества, при различных начальных температурах и давлениях. Оценивается диапазон параметров закалки химического состава огненного шара, при которых вода является основным компонентом ударно-образованной лунной атмосферы. На основании имеющихся оценок температуры лунной поверхности в области холодных ловушек определены компоненты временной лунной атмосферы, конденсация которых в холодных ловушках термодинамически возможна. Разработана модель роста температуры реголита с глубиной в районе холодных ловушек. Приведены оценки температуры подповерхностного слоя реголита, при которых возможно сохранение летучих соединений в холодных ловушках в течение геологических масштабов времени. Рассматриваются различия в изотопном составе воды различного происхождения.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Выдвинут механизм образования наблюдавшихся на Юпитере соединений во время столкновения с планетой кометы Шумейкеров-Леви 9. Молекулы были синтезированы в нижней стратосфере планеты, а затем были выброшены ударной волной на высоты 200–300 км.

2. Предложен метод оценки размеров крупнейших фрагментов кометы

Шумейкеров-Леви 9 и глубины их проникновения в атмосферу планеты по данным наблюдений молекул.

3. Построена модель химического состава газового шара, образующегося при столкновении кометы с Луной. В предположении сохранения кометного вещества на Луне во время удара оценены параметры временной лунной атмосферы кометного происхождения и определены компоненты этой атмосферы, конденсация которых термодинамически возможна в холодных ловушках на полюсах Луны.

4. Исследован температурный режим полярных областей Луны. Получены сведения о сохранности летучих в холодных ловушках.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. По оцененной температуре (1000–1400 К) и давлению (0.1–10 кПа) закалки химического состава возмущенной области во время столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером предложен механизм синтеза наблюдавшихся соединений в нижней стратосфере планеты.

2. По данным наблюдений молекул оценены размеры крупнейших фрагментов кометы Шумейкеров-Леви 9 (2–3 км) и глубина их проникновения в атмосферу Юпитера (–100 км).

3. Показано, что вода является основным компонентом газового шара, образующегося при практически всех возможных вариантах столкновения кометы с Луной. На основании теории закалки оценено содержание других химических соединений в газовом шаре.

4. Показана возможность образования временной лунной атмосферы после столкновения кометы с Луной и сохранения летучих соединений кометного происхождения в холодных ловушках на полюсах Луны в течение геологических промежутков времени.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

1. Автором предложено применение теории закалки к случаю столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером. Разработана методика определения

параметров закалки на основании совместного рассмотрения данных наблюдений и теоретических расчетов с использованием как равновесного приближения, так и кинетического подхода.

2. Самостоятельно проведены автором все расчеты равновесного химического состава огненного шара как для случая столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером, так и для случая столкновений комет с Луной.

3. В.В. Шевченко предложена задача об особенностях химического состава полярных отложений кометного происхождения в холодных ловушках Луны, автор выдвинул способ решения этой задачи.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

1. Разработанный в диссертационной работе метод исследования модификации химического состава атмосферы Юпитера во время столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с планетой применим к столкновениям комет с планетами-гигантами и Титаном. Исследование химической эволюции атмосфер планет-гигантов и Титана под действием столкновений этих тел Солнечной системы с кометами позволит оценить важность кометного фактора в эволюции атмосфер планет-гигантов и Титана.

2. Возможно применение разработанной методики определения химического состава огненного шара, образующегося при столкновении комет с Луной, к изучению физико-химических процессов при столкновениях комет с другими крупными безатмосферными спутниками планет и Меркурием.

3. Полученные оценки химического и изотопного состава летучих соединений в холодных ловушках на полюсах Луны могут непосредственно использоваться при разработке научно-исследовательских программ космических аппаратов, изучающих Луну.

4. Предложенная методика определения химического состава реголита полярных районов Луны под действием кометных ударов применима с некоторыми

изменениями к исследованию химического состава полярных регионов Меркурия и галилеевых спутников Юпитера.

АПРОБАЦИЯ

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. International Conference on the SL9-Jupiter Collision, July 3-5, 1996, Meudon, France
2. Конференция студентов и молодых ученых по астрономии (Киев, 1996)
3. Международная студенческая конференция "Ломоносов-97" (Москва, 1997)
4. International Conference "Planetary systems - the long view", Blois, France, 1997
5. 26 микросимпозиум по сравнительной планетологии "Вернадский - Браун" (Москва, 1997)
6. Международная студенческая конференция "Физика и дидактика" (Poland, Kielce, 1997)
7. Научный семинар лаборатории эволюции Земли и планет Института Геофизики ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта (Москва, 1998)
8. 3 Международная конференция по исследованию и освоению Луны (Москва, 1998)

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бережной А.А., Клумов Б.А., Фортвов В.Е., Шевченко В.В. *Столкновение кометы с Юпитером: определение глубины проникновения осколков по молекулярным спектрам*, Письма в ЖЭТФ, Т. 63, № 6, С. 387-391, 1996
2. Berezhnoi A.A., Klumov B.A., Fortov V.E., Shevchenko V.V. *Shock chemistry in Jovian atmosphere following SL9 impact*, International Conference on the SL9-Jupiter Collision, I-2, July 3-5, 1996, Meudon, France
3. Berezhnoi A.A., Dorofeeva V.A. *The behavior of sulfur during impact interactions of comets with the Moon*, Experiment in Geosciences, Vol. 6, № 2, p. 77, 1997

4. Berezhnoi A.A. *About comet origin of lunar ice*, Experiment in Geosciences, Vol. 6, № 2, p. 76, 1997
5. Shevchenko V., Berezhnoi A. *A probable source of the polar ice on atmosphereless planets and satellites*, 9emes Rencontres de Blois: Planetary systems - the long view, Blois, France, p. 55, 1997
6. Berezhnoi A.A., Shevchenko V.V., Dorofeeva V.A. *Comets-probable source of volatiles on the Moon*, 26 Microsymposium on comparative planetology, October 13-17, 1997, Moscow, Russia
7. Berezhnoi A.A. *Water ice and Sulfur on the Moon*, International Conference “Physics and Didactics”, Kielce, Poland, December 1-7, 1997
8. Berezhnoi A.A., Klumov B.A. *Lunar ice: Can its origin be determined?* JETP Letters, V. 68, No. 2, p. 163-167, 1998
9. Berezhnoi A.A., Shevchenko V.V., Klumov B.A. *Some features of the cometary origin ice on the Moon*, Abstr. 3 International Conference on Exploration and Utilization of the Moon, p. 33, October 11-14, Moscow, Russia

В заключение хочу выразить признательность своему научному руководителю проф. В.В. Шевченко за постановку задач, руководство и внимание к моей работе. Хочу поблагодарить Ж.Ф. Родионову, В.И. Чикмачева, других коллег из отдела исследований Луны и планет ГАИШ МГУ за плодотворные дискуссии. Особое спасибо А.В. Топоренскому. Я признателен соавторам из других институтов: В.А. Дорофеевой, Б.А. Клумову.

Исследования, вошедшие в данную диссертацию, были поддержаны грантами РФФИ и ГНТП “Астрономия”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Noll K.S. et al. Science, 267, 1307, 1994
2. Bockelee-Morvan D., Proc. European SL9/Jupiter Workshop, p. 251, February 13-15, 1995
3. Ивлев А.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 61, 423, 1995

4. Zahnle K. et al. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1593, 1995
5. Borunov S. et al. *Icarus*, 125, 121, 1997
6. Шевченко В.В. *Астрон. Вестн.*, 30, 59, 1996
7. Watson K., Murray B.C., Brown H. J. *Geophys. Res.*, 66, 3033, 1961
8. Arnold J. R. J. *Geophys. Res.*, 84, № B10, 5659, 1979
9. Nozette S., Lichtenberg C.L., Spudis P. et al. *Science*, 275, № 5292, p. 1495, 1996
10. Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al., *Science*, V. 281, p. 1496, 1998