



Кометы  
и  
происхождение  
жизни

# Comets and The Origin of Life

Proceedings of the Fifth College Park Colloquium  
on Chemical Evolution  
University of Maryland: College Park, Maryland, U. S. A.

Edited by  
Cyril Ponnampereuma

Laboratory of Chemical Evolution, Department of Chemistry  
University of Maryland: College Park, Maryland, U. S. A.

D. Reidel Publishing Company  
Dordrecht : Holland/Boston: U.S.A.  
London : England

# Кометы и происхождение жизни

550.2

Под редакцией С. Поннамперумы

Перевод с английского  
канд. хим. наук Д. Б. Кирпотина  
канд. физ.-мат. наук В. В. Рыбина

под редакцией  
д-ра биол. наук Г. А. Деборина  
д-ра физ.-мат. наук С. М. Полоскова

4275

Москва „Мир“ 1984



ББК 22.655

К 63

УДК 523.6 + 577

**Кометы и происхождение жизни.** Пер. с англ./Под ред.  
К63 С. Поннамперумы. — М.: Мир, 1984. — 230 с., ил.

В коллективной монографии, написанной видными специалистами Голландии, Италии, Канады, США, ФРГ, представлены наиболее ценные материалы международного симпозиума (США, Мэриленд, 1980), созванного в непосредственной связи с предстоящим в 1986 г. возвращением к Солнцу кометы Галлея. Согласно современным представлениям, излагаемым в книге, кометы являются древними объектами, содержащими замороженное «первичное» вещество, из которого образовались все тела Солнечной системы. Всесторонне обсуждается идея о том, что органические соединения, доставленные кометами из космоса, могли послужить строительным материалом для земной биосферы.

Для астрономов, биологов, космохимиков, специалистов по исследованию космического пространства.

К  $\frac{1705050000-426}{041(01)-84}$  86-84, ч. 1

ББК 22.655

526

*Редакция литературы по космическим  
исследованиям, астрономии и геофизике*

© 1981 by D. Reidel Publishing Company,  
Dordrecht, Holland

© Перевод на русский язык с сокращениями, «Мир», 1984

## Предисловие редакторов перевода

В течение последнего десятилетия повсеместно отмечается возросший интерес к изучению комет, нашедший свое отражение и в постановке специальных астрофизических исследований комет, и в большом количестве публикаций как в научной, так и в научно-популярной литературе. Причиной этого послужили главным образом два обстоятельства: во-первых, открытие в 1975 г. чешским астрономом Когоутеком кометы, получившей название «кометы века», и, во-вторых, ожидаемое в 1985—1986 гг. появление знаменитой кометы Галлея.

В книге, предлагаемой вниманию читателя, кратко излагаются результаты астрофизических исследований комет в последнее десятилетие, что само по себе представляет большой интерес. Однако главная цель этой книги, как видно из ее названия, — рассмотреть, не связаны ли кометы с происхождением жизни на Земле. Развитие научных представлений о происхождении жизни и успешное освоение человечеством новой среды обитания — космического пространства — логически привели к поиску истоков жизни не только на Земле, но и в космосе. В этой области успешно работают ученые разных стран — астрономы, астрофизики, геохимики и геофизики, биохимики, биологи. Обнаружение в космической среде органических молекул — «сырья» для химической эволюции, наличие в метеоритах аминокислот, углеводов и других углеродистых соединений, обычно тесно связанных с жизненными процессами, поразительное открытие возможности преодоления «хаоса» в реакциях полимеризации, протекающих в условиях космического пространства, — все это служит подтверждением слов основоположника современных представлений в этой области А. И. Опарина о том, что «возникновение жизни являлось неотъемлемой составной частью общего эволюционного развития нашего мира»<sup>1)</sup>.

Данный сборник включает наиболее ценные материалы коллоквиума, проведенного Лабораторией химической эволюции Мэрилендского университета (США), которой руководит известный исследователь проблемы происхождения жизни, лауреат Международной золотой медали имени академика А. И. Опарина С. Поннамперума. Коллоквиум был целиком посвящен исследованию комет — небесных тел, которые по своей доступности для Земли, по своеобразию физико-химических условий (наличие органики, льда, а может быть, и жидкой воды, подверженность различным энергетическим воздей-

<sup>1)</sup> А. И. Опарин. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. — М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 37.

ствиям, пожалуй, наиболее привлекательны для биохимиков, работающих в области проблемы происхождения жизни. В статьях сборника, написанных известными специалистами из разных стран, приведены современные данные о непосредственном участии комет в химической предбиологической эволюции на Земле. Наряду с этим затронут широкий круг вопросов, касающихся формирования и геохимической эволюции Земли, рождения комет, состава космической пыли и химии процессов, протекающих в космическом пространстве.

В книге показано, что если искать область, откуда могут быть доставлены на Землю сложные органические молекулы, то это должна быть либо межзвездная среда, либо далекая окраина Солнечной системы, где по современным представлениям сосредоточены так называемые долгопериодические, или «молодые», кометы. В этом смысле для понимания физических процессов и условий наиболее важны главы, написанные Уипплом, Фельдманом, Брауном, Донном и Хюбнером. Вместе с тем трудно согласиться с положениями Хойла и Викрамасингха о повсеместном изобилии живых клеток в космосе, хотя бы потому, что этот тезис не снимает вопроса о возникновении жизни, а лишь переносит его с Земли в иную среду — космос, где решение вопроса о ее возникновении представляется еще более проблематичным, как справедливо отмечает в своей статье Дельземм. Большинство авторов сборника считают, что внесение жизни в готовом виде, т. е. живых организмов, даже самых простейших, на Землю не представляется возможным, если исходить из того, что мы знаем теперь о физических условиях и процессах в межпланетном и межзвездном пространстве. Именно поэтому для биологов и биохимиков особый интерес представляют сложные органические соединения, возможно содержащиеся в кометах.

Как свидетельствует разнообразие точек зрения, проблема происхождения жизни чрезвычайно сложна, и в настоящее время трудно сформулировать требования к соединениям-«зародышам», попадание которых на Землю с необходимостью привело бы к возникновению жизни. Однако совершенно ясно, что исследование «космического» аспекта этой проблемы сулит значительный прогресс наших познаний в этой области.

Данная книга освещает на современном уровне важный аспект проблемы происхождения жизни и удачно дополняет серию посвященных этой проблеме сборников и монографий, выпущенных ранее издательством «Мир». Говоря о ее содержании, нельзя не отметить разнообразие методических подходов, использованных авторами статей. Это и обобщение результатов наблюдений космических объектов, и математическое моделиро-

вание изучаемых явлений, и экспериментальные исследования на модельных лабораторных системах.

Переводчики и редакторы русского издания старались сохранить стиль (иногда довольно своеобразный) и терминологию авторов. Учитывая это, необходимо отметить, что термин «кома», например, имеет у авторов довольно широкий смысл. В соответствии с принятой в отечественной литературе по кометам терминологии, основанной на классификации кометных форм, различаются понятия: кома и голова кометы. Комой называется туманное образование в окрестностях ядра, видимое на больших расстояниях от Солнца (больше 2 а. е.), до полного развития кометных форм. Голова — это сложное образование, состоящее из ряда оболочек вокруг ядра, которое возникает после полного развития кометных форм. Авторы книги не проводят различия указанных понятий. Кроме того, в отечественной литературе используется термин «фотохимическое ядро», который эквивалентен упоминаемому в книге понятию «внутренняя кома». Эта область вблизи ядра, где происходит распад родительских и прародительских молекул, очень четко очерчивается на фотографиях, тогда как само ядро остается невидимым.

Следует отметить, что данную книгу, посвященную связи комет с происхождением жизни, нельзя рассматривать как монографию, содержащую последовательное изложение современных представлений о кометах. Для более систематического ознакомления с результатами исследований комет можно рекомендовать, например, следующую литературу: *Добровольский О. В.* Кометы., М., Наука, 1966. *Левин Б. Ю.* Кометы. — В кн.: Физика космоса. Советская энциклопедия, 1976. *Чурюмов К. И.* Кометы и их наблюдение. М., Наука, 1980.

При переводе сборника некоторые материалы, представляющие ограниченный интерес для советского читателя, были опущены. Хотелось бы выразить признательность издательству «Рейдель» за разрешение опубликовать сборник на русском языке в сокращенном виде. Первая часть книги (с. 8 — 108) была переведена В. В. Рыбиным, а вторая (с. 109 — 227) — Д. Б. Кирпотиним.

Появление этой книги, которая выходит в свет незадолго до очередного возвращения к Солнцу исключительно яркой долгопериодической кометы Галлея, должно, как нам кажется, привлечь внимание не только специалистов — астрономов, биологов и биохимиков, — но и более широкого круга читателей, интересующихся проблемами современной науки.

Г. А. Деборин  
С. М. Полосков

## Предисловие

Предстоящее в 1986 г. возвращение кометы Галлея во внутренние области Солнечной системы вызывает значительный интерес научной общественности. В связи с этим событием уже намечается программа мероприятий Международной службы наблюдений комет и программа запусков космических аппаратов для изучения кометы Европейским космическим агентством, а также японскими и советскими исследователями космоса. Симпозиум, проведенный Мэрилендским университетом в октябре 1980 г., был создан в целях подготовки дальнейших исследований этой кометы и посвящен одному из наиболее важных вопросов, до настоящего времени остающихся без ответа, — а именно вопросу о том, могли ли кометы способствовать зарождению жизни на Земле.

Астрономические наблюдения и изучение химии комет позволяют лучше понять роль комет в происхождении жизни. Именно исследование комет — этих наиболее древних объектов Солнечной системы — может дать ключ к пониманию процессов, приводящих к образованию органических молекул и в конечном итоге — к появлению жизни. Будущее покажет, имеются ли основания говорить о биологии комет, хотя некоторые утверждают, что кометы сами по себе, возможно, обеспечивают среду для возникновения жизни.

На этом симпозиуме присутствовали специалисты, знакомые с самыми последними достижениями в области исследования комет и придерживающиеся различных мнений о роли комет в происхождении жизни. Статьи, опубликованные в этой книге, делают представленные ими сведения доступными для всех читателей, интересующихся вопросами химической эволюции вещества в Солнечной системе.

Я благодарю Отдел планетарной биологии Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) и Центр космических полетов НАСА им. Годдарда за финансовую поддержку, которая сделала возможным проведение этого симпозиума, а также выражаю признательность всему персоналу моей Лаборатории химической эволюции за помощь в проведении симпозиума. Особо хочу поблагодарить моего научного ассистента Анджелу Мэрфи за ее неоценимую помощь в составлении этой книги. Я благодарю также Алена Мак-Клэра за фотографию кометы Мркоса (1957 V), показанную на переплете английского издания книги.

*Колледж-Парк, Мэриленд  
Март 1981 г.*

*Сирил Поннамперума*

# Природа комет

Ф. Л. Уиппл<sup>1)</sup>

Статья дает беглый обзор общих сведений об орбитах комет, их относительном «возрасте», связи с облаком Оорта, негравитационных силах, размерах и вращении ядер. После краткого обсуждения состава ядер приводятся некоторые данные об их однородности и возможной эволюции в астероиды, пересекающие орбиту Земли. Последнее связано с вопросом о том, имеются ли в лабораториях образцы кометного вещества, отличающиеся от частиц Браунли<sup>2)</sup>. Затем рассматриваются вопросы, касающиеся природы и места образования комет, в частности возможность прямого участия межзвездной среды в этом процессе; приводятся сведения о роли сверхновых (по данным исследования метеоритов) для структуры комет и их активности. Далее рассматривается химическое и физическое строение комет, в частности данные о наличии аморфного льда и действии космических лучей на новые кометы. В связи с вопросами радиоактивного разогрева, возможных экзотермических реакций и внутреннего строения комет дан обзор многих результатов, относящихся к вспышкам, делению комет, струям, галосам, пыли и основной кометной структуре. К этим вопросам примыкают предположения, касающиеся роли комет в появлении жизни и возможного привноса летучих веществ комет на Землю и планеты земной группы.

Поскольку здесь собрались специалисты для обсуждения большинства аспектов исследований комет, я не намерен делать обзор всей этой области. Мне хотелось бы сосредоточить ваше внимание на вопросе, который постоянно занимает меня вот уже более 30 лет: превращаются ли кометы в астероиды? Раньше я не касался этого вопроса в публикациях или выступлениях, поскольку данных было совершенно недостаточно. Хотя и сейчас я не знаю точного ответа на этот вопрос, мне хочется познакомить вас с некоторыми фактами и аргументами.

---

<sup>1)</sup> Смитсоновская астрофизическая обсерватория, Кеймбридж, Массачусетс 02138, США.

<sup>2)</sup> Смысл термина «частицы Браунли» объясняется далее в статье Браунли. — *Прим. ред.*

Указанный вопрос приобретает особую значимость в связи с предположениями о возникновении жизни на кометах, поскольку, как показано в работе [13], в результате вспышки сверхновой  $^{26}\text{Al}$  мог инжектироваться в Солнечную систему на ранних стадиях ее эволюции. Так как период полураспада  $^{26}\text{Al}$  составляет около 700 тыс. лет, то при коротком периоде формирования комет, составляющем несколько миллионов лет, их внутренние части могли нагреваться, что приводило к образованию астероидных ядер. С другой стороны, если рост комет вследствие аккумуляции продолжался 10 млн. лет или более, то этим нагревом можно пренебречь.

В сущности, комета представляет собой ком грязного снега в космосе. Все наблюдаемые ее проявления определяются процессами, связанными с выделением газов и пыли. Мы наблюдаем только эти явления, а не процессы, происходящие в ядре,— для знакомства с последними надо ждать исследований с помощью космических аппаратов или достаточно мощных радиолокаторов. При сублимации льда под действием солнечного излучения с кометы уносится пыль, и мы наблюдаем свечение газов в коме и ионов в хвосте, образуемом под воздействием солнечного ветра. Наблюдается также прямое рассеяние солнечного света пылью. Говоря о природе комет, следует, как я полагаю, иметь в виду природу их ядер. Поэтому я не буду обсуждать процессы в ионном (плазменном) хвосте, которые исключительно интересны сами по себе. О ядре они говорят нам очень немного.

Иллюстрацией комет сразу двух типов — с аномально большим пылевым хвостом сзади и с ионным хвостом — может служить комета Веста (1976 VI), а также комета Мркоса (1957 V), изображенная на рис. 1. На photographиях в красном свете тонкий и прямой ионный хвост почти исчезает. Но у некоторых комет имеется только ионный хвост.

Для меня комета Энке, показанная на рис. 2, является розеттским камнем науки о кометах. На рис. 2 видна асимметрия комы, которая является ключом для определения оси вращения кометы. Направление смещения более или менее перпендикулярно к оси вращения. Отставание максимума сублимации льда на ядре влияет на смещение, так что по величине последнего можно определить ось вращения, а также угол отставания. Такую асимметрию проявляют многие кометы — у них, таким образом, можно определить направление оси вращения.

Схема, показанная на рис. 3, представляет структуру кометы как явления. Крошечное ядро кометы невидимо; выбрасываемый газ увлекает с собой пыль, которая сметается солнечным излучением и создает пылевой хвост. Ионы захватываются сол-

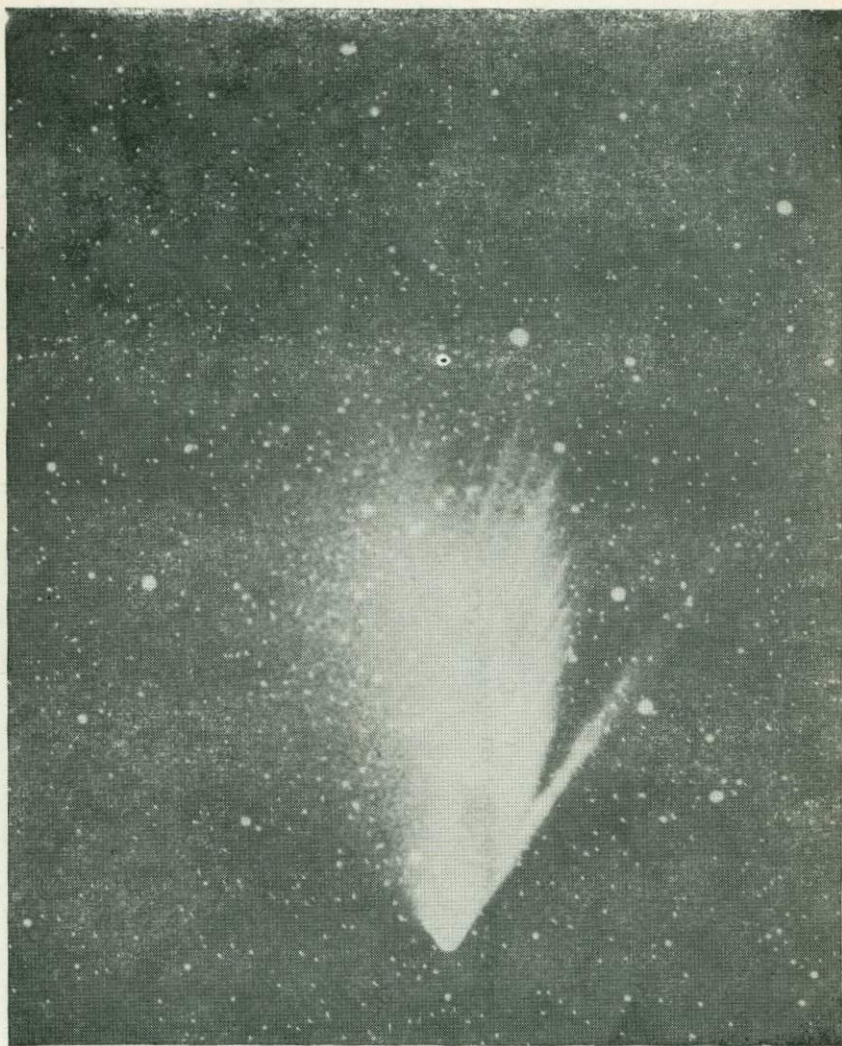


Рис. 1. Комета Мркоса (1957 V). Обратите внимание на полосы в пылевом хвосте. (По А. Мак-Клэру.)

нечным ветром — очень горячим газом, истекающим от Солнца в количестве миллион тонн в секунду при скорости около 400 км/с. Солнечный ветер приводит к образованию большого ионного хвоста — своеобразной фирменной марки больших комет.

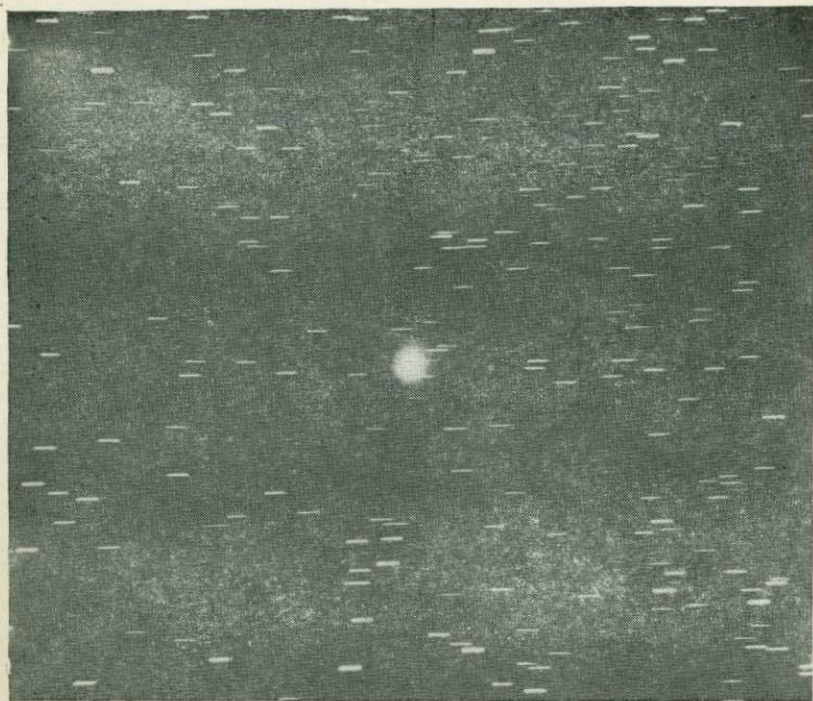


Рис. 2. Периодическая комета Энке. (Снимок сделан в Йеркской обсерватории.)

Хотя для публики комета Когоутека (1973 VII) имела невзрачный вид<sup>1)</sup>, эта комета дала нам больше сведений, чем какая-либо другая в последние годы. Причина заключалась в возможности широкого использования техники космического века, предоставленной при финансовой поддержке НАСА. На рис. 4 показаны два ракетных снимка кометы Когоутека, сделанные почти одновременно с помощью аппаратуры, разработанной Опалом и др. [16]. Представленный слева снимок в видимом диапазоне имеет вполне обычный вид. Однако снимок в крайнем ультрафиолете (справа) демонстрирует излучение нейтральных атомов водорода, и оказывается, что водородная атмосфера кометы по размерам больше Солнца!

Как было отмечено на недавнем совещании исследователей комет в Центре космических полетов им. Годдарда, входящие

<sup>1)</sup> На основании первоначальных определений орбиты ожидалось, что комета Когоутека столкнется с Солнцем. Однако такого столкновения не произошло, хотя перигелийное расстояние и было очень малым. — *Прим. ред.*

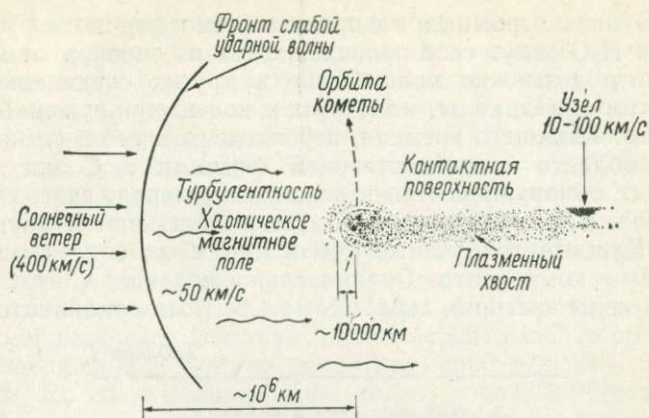


Рис. 3. Схема взаимодействия кометы с солнечным ветром.

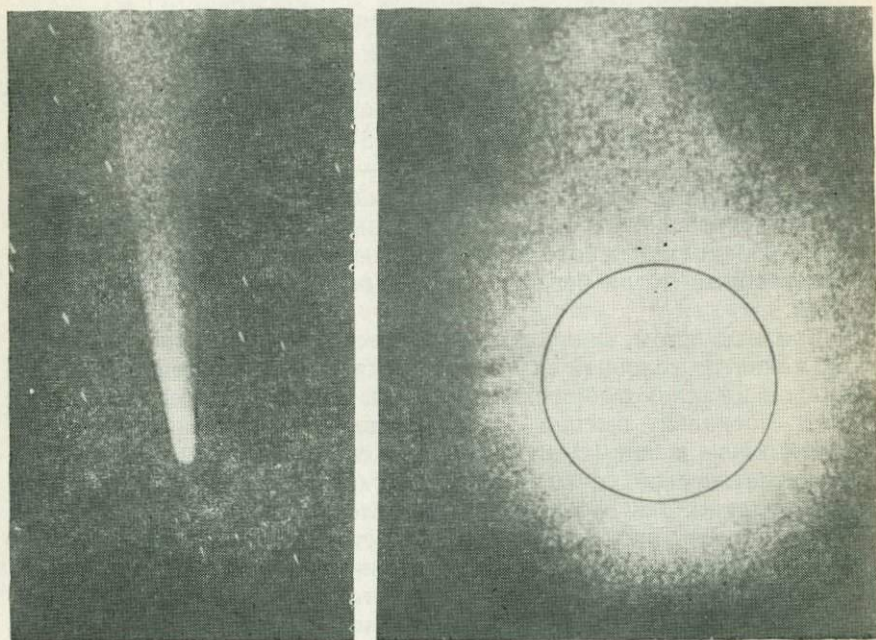


Рис. 4. Снимки кометы Когоутека (1973 XII), сделанные с ракеты «Аэробия». Слева — снимок в оптическом диапазоне, справа — в линии  $\text{Ly}\alpha$  ультрафиолетового излучения водорода. Круг показывает диаметр Солнца на том же удалении.

в состав этих огромных водородных атмосфер комет ионы Н, ОН, О и  $\text{H}_2\text{O}$  ведут свое происхождение в основном от молекул воды, хотя возможно присутствие и других соединений водорода. Атомы, радикалы, молекулы и ионы, обнаруженные в кометах до настоящего времени, перечислены в табл. 1. За исключением области непосредственной близости к Солнцу, всюду в кометах обнаруживаются в основном углерод, азот, кислород и водород. Вблизи Солнца в кометах наблюдают и другие элементы. Каждый год ученые добавляют в их список один или два новых компонента. Сравнительно недавно в этот список были внесены кремний, сера,  $\text{CN}^+$  и  $\text{CS}$ . Если сравнивать состав

Таблица 1

---

*Наблюдаются в кометах*  
 С,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$ , СН, CN, CS,  $\text{CH}_3\text{CN}$ , HCN  
 NH,  $\text{NH}_2$ , O, OH,  $\text{H}_2\text{O}$ , Na, S, Si

*Вблизи Солнца*  
 Ca, Co, Cr, Cu, Fe, V

*В хвосте*  
 $\text{CH}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CN}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$   
 и частицы силикатов

---

комет с Солнцем, то, вероятно, можно говорить лишь о меньшем относительном содержании в них водорода и инертных газов. Пока еще не обнаружены в кометах молекулы  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$ , которые могли бы быть исходными в цепи химических реакций.

Вопросы о том, могут ли нагреваться ядра комет и может ли при каких-то условиях осуществляться их превращение в астероиды, заставляют обратиться к очень важному классу «новых» комет, поскольку именно с ними, а не со «старыми» кометами связан ключ к пониманию этих процессов. «Самыми старыми» со статистической точки зрения являются периодические кометы. Они движутся весьма близко к плоскости эклиптики по орбитам, направленным с запада на восток. Периоды их по большей части невелики и составляют примерно до 25 лет или около того. Новые кометы движутся по орбитам с очень большими периодами, что соответствует представлениям, развитым Оортом. Орбиты их ориентированы случайным образом. На рис. 5 и 6 представлены данные, лежащие в основе идеи кометного облака Эпика — Оорта и представлений Оорта о новых и молодых кометах, как они были изложены в статье [15]. Рис. 5 показывает приведенные в [15] значения обратных величин  $1/a$  полуосей

почти-параболических комет в зависимости от их перигелийного расстояния  $q$ ; величины  $1/a$  исправлены с учетом возмущений планетами: приводятся начальные значения, соответствующие входу кометы в область, занятую планетами. Если, например, исходное значение  $1/a$  равно  $50 \cdot 10^{-6}$  (а. е.) $^{-1}$ , то комета пришла из афелия, находящегося на расстоянии  $2/(50 \cdot 10^{-6}) = 40\,000$  а. е., и двигалась первоначально по орбите с некоторым перигелийным расстоянием. В соответствии с идеей Оорта такая комета пребывала в Солнечной системе на больших расстояниях от Солнца, пока проходящая мимо звезда не перевела ее примерно 1,4 млн. лет тому назад на указанную орбиту. Из-за возмущающего действия планет вероятность ее последующего возвращения к Солнцу равна примерно 1/2. Рис. 6 иллюстрирует это заключение. Как было показано Эверхартом [4—6], комета с перигелием на орбите Юпитера и малым наклоном орбиты к плоскости эклиптики вследствие возмущения Юпитером имеет шанс перейти на орбиту с более коротким периодом и стать в конечном счете короткопериодической кометой. В глубоком холоде космоса она, можно сказать, сохраняет свою молодость в течение примерно 4,6 млрд. лет, но начинает стариться с первого же прохода вблизи Солнца. Негравитационные силы, создаваемые действием струи газов, выбрасываемых вследствие сублимации, приводят к тому, что новые кометы не могут быть уверенно отождествлены, если их перигелийное расстояние ниже примерно 2 а. е.

Все существенные различия между старыми и новыми кометами крайне важны для нашего анализа. Если тепловыделение изотопа  $^{26}\text{Al}$  приводит к расплавлению ядра кометы, оно перестанет себя как-либо проявлять, как только внешние слои удалятся в результате сублимации. Вопрос о том, какие изменения в кометных ядрах могли бы породить различные радиоактивные элементы, и в том числе  $^{40}\text{K}$ , был рассмотрен в работе [24]. Расчеты нагрева под действием  $^{26}\text{Al}$  приводятся в [9, 22].

Кометы в соответствии с их «возрастом» можно разделить на классы. Класс I ( $1/a < 50 \cdot 10^{-6}$  (а. е.) $^{-1}$ ) включает в себя почти все новые кометы, в то время как в класс II входят несколько новых комет и те кометы, которые уже совершили несколько оборотов. В классы IV—V входят кометы, имеющие очень короткие периоды и совершившие уже много оборотов вокруг Солнца. Наиболее интересная их особенность заключается в том, что лишь немногие очень короткопериодические кометы можно наблюдать на больших расстояниях от Солнца. На рис. 7 приведен график из работы [10], который показывает зависимость максимального расстояния видимости от величины перигелийного расстояния короткопериодических комет. Очень

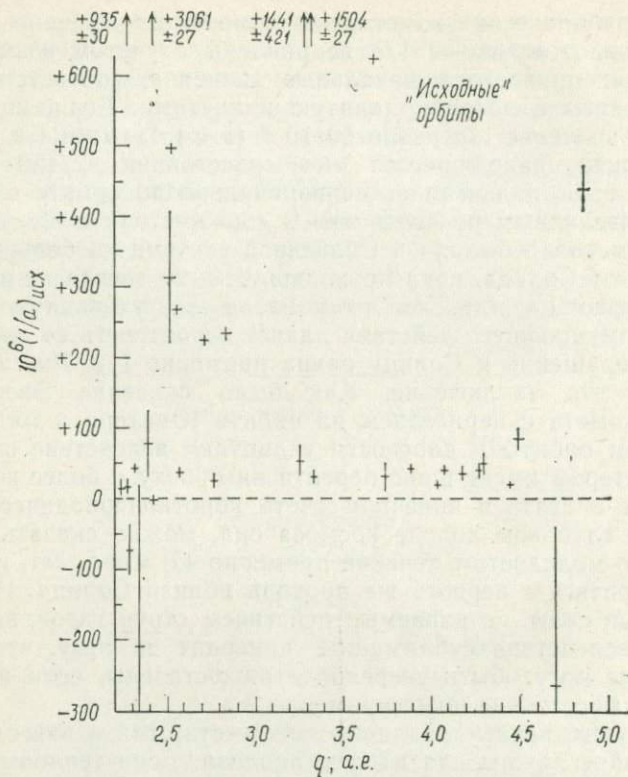


Рис. 5. Кометы с почти-параболическими орбитами. По вертикали отложены обратные величины главных полуосей до входа в планетную систему. По горизонтали — перигелийное расстояние. Пунктир соответствует параболической орбите.

мало комет наблюдалось на расстояниях более 4 а. е., причем резкий спад их числа соответствует расстоянию около 3 а. е. На таком расстоянии от Солнца давление водяного пара, образующегося из льда, становится пренебрежимо малым. Таким образом, лед  $H_2O$  должен быть главным ингредиентом короткопериодических комет, хотя в большинстве из них или даже во всех таких кометах, по-видимому, проявляют активность также льды других, более летучих веществ. Как было показано в работе [11], весьма яркие кометы с периодами, не превышающими 2900 лет (в частности, комета Хьюмасона, 1962 VII), наблюдались на расстояниях свыше 9 а. е.

Для сравнения активности новых комет хорошей иллюстрацией являются кривые блеска. Наблюдаемый блеск кометы можно характеризовать фактором  $\Delta^{-2}r^{-n}$ , где  $\Delta$  и  $r$  — соответ-

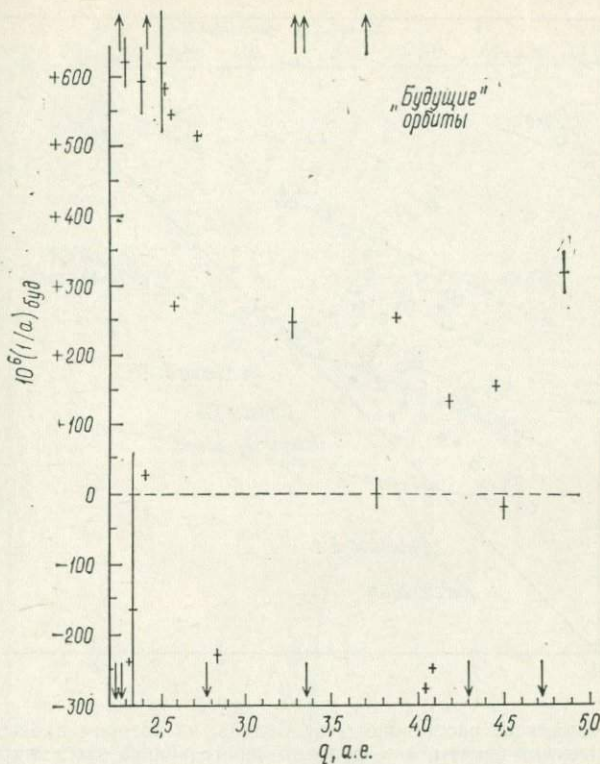


Рис. 6. Те же самые кометы, что и на рис. 5, в момент ухода из планетной системы. Появляются сильные возмущения главных полуосей, вызванные влиянием планет. Многие орбиты становятся гиперболическими.

ственно гео- и гелиоцентрические расстояния. Я обнаружил, что для ряда новых комет значение  $n$  при приближении к перигелию составляет примерно 2,4, но старые кометы имеют более высокие значения этого параметра (4—5). С другой стороны, при удалении от перигелия значение  $n$  у всех комет примерно одно и то же ( $\sim 3,4$ )<sup>1)</sup>. Это различие выражено очень четко. Донном и мною [2] было высказано предположение, что *внешние* слои новых комет (толщиной порядка метров при единичной плотности) содержат высокоактивные аморфные льды, образовавшиеся под действием космических лучей в течение 4,6 млрд лет

<sup>1)</sup> Следует указать, что зависимость блеска комет от гелиоцентрического расстояния исследовалась давно и для многих комет рядом исследователей и давалось теоретическое объяснение этого явления. — *Прим. ред.*



4275

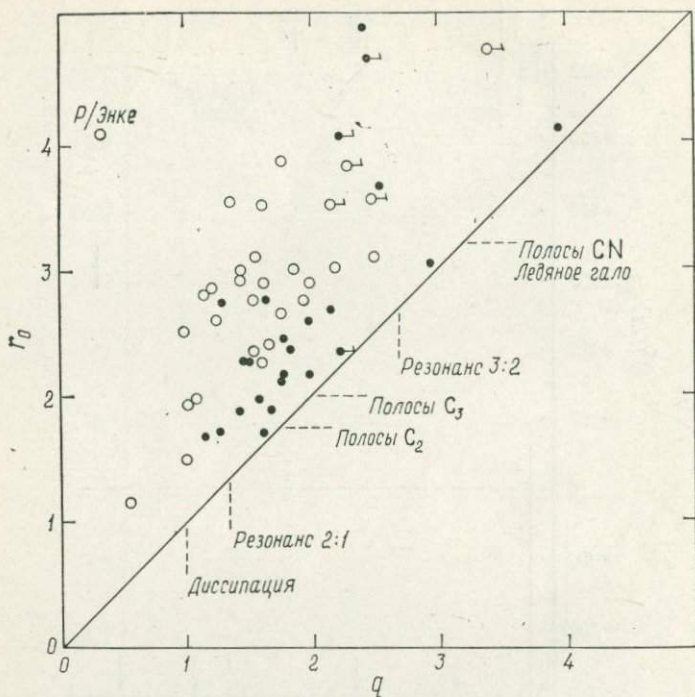


Рис. 7. Максимальное расстояние  $r_0$  от Солнца, на котором наблюдаются короткопериодические кометы, как функция перигелийного расстояния  $q$ . Кружки — часто наблюдаемые кометы, точки — другие короткопериодические кометы, флажки — кометы, которые были недавно зарегистрированы начиная с расстояний  $q > 3,2$  а. е. [10].

Следовательно, новые кометы будут более активны, пока их внешняя намерзшая часть не будет удалена. Этот вывод согласуется с полученным Марсденом и Секаниной [15] результатом, что новые кометы составляют значительную часть долгопериодических комет с большими перигелийными расстояниями. Эти новые кометы просто много ярче при первых проходах, чем при последующих, так что реально они и будут обнаруживаться более часто. Большой начальный блеск кометы Когоутека при  $r > 4$  а. е. и резкий его спад уже вблизи перигелия хорошо иллюстрируют это утверждение. Заметим, что Кресак [11] не согласен с таким выводом, основанным на различии блеска в соответствии с приведенными зависимостями для старых и новых комет.

На рис. 8 приведены данные о блеске некоторых хорошо известных комет. Комета Вестфала при ее первом возвращении к Солнцу в 1913 г. стала настолько слабой на пути к перигелию,

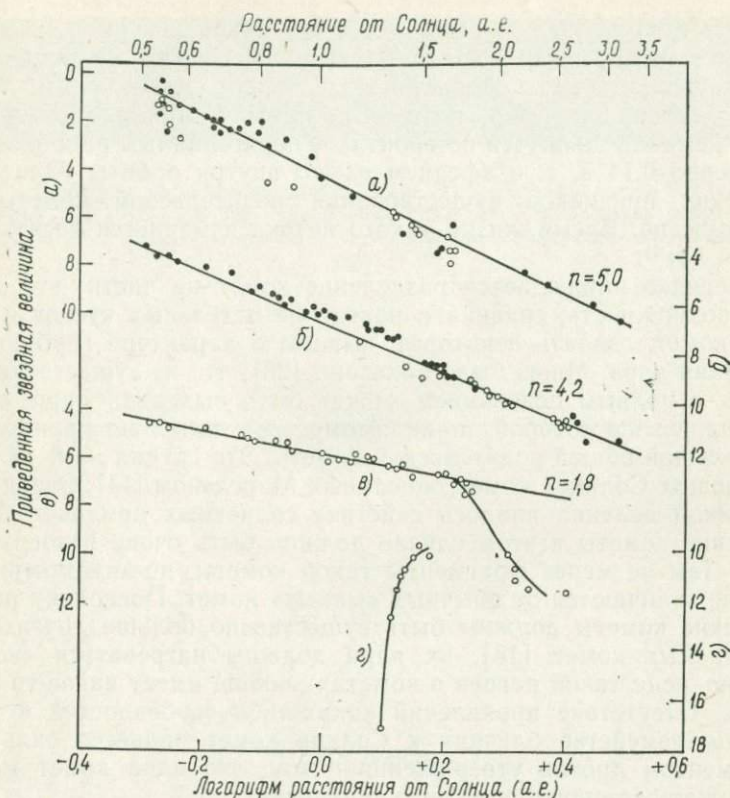


Рис. 8. Звездные величины четырех комет, приведенные к стандартному расстоянию 1 а. е., в зависимости от логарифма расстояния до Солнца. Кружки — значения до прохождения перигелия, точки — после перигелия. Определение величины  $n$  см. в тексте. Кометы Каннингхэма и Аренда — Ролана являются новыми кометами, комета Беннета — долгопериодическая, а комета Вестфала перед своим исчезновением имела период 62 года. (Л. Яхья, Sky and Telescope Magazine.) а) комета Беннета (1970 II); б) Аренда — Ролана (1957 III); в) Каннингхэма (1941 I); г) Вестфала (1913 VI).

что ее нельзя было обнаружить, несмотря на усиленные поиски. Однако три короткопериодические кометы наблюдались долго, пока не исчезли после прохождения перигелия от двух по пяти раз. Это кометы Брозена ( $P = 5,5$  лет, 5 прохождений в течение 1846—1879 г.), Темпля — Свифта ( $P = 5,7$  лет, 4 прохождения с 1869 по 1908 г.), Неуймина 2, ( $P = 5,4$  года, два прохождения с 1916 по 1927 г.). Таким образом, наблюдения нескольких комет ясно показывают, что их остаточное неледяное ядро, если и существовало вообще, должно было быть чрезвычайно мало. С другой стороны, комета Неуймина 1 ( $P =$

= 17,9 лет) в 1913 г. была довольно яркой, а при появлении в 1966 г. имела почти звездоподобный вид. Некоторые полностью исчезнувшие кометы представлены теперь метеорными потоками; таков, например, метеорный поток Геминид. Метеорные тела Геминид движутся по орбитам с перигелийным расстоянием примерно 0,14 а. е. и афелием где-то внутри орбиты Юпитера. Никаких признаков существования родительской кометы не обнаружено. Время жизни такого потока измеряется десятками тысяч лет<sup>1)</sup>.

Нередко наблюдается разделение комет на части; это дает нам возможность, сравнивая поведение отдельных кусков и целых комет, сделать некоторые выводы о характере глубинного строения ядра. Мною было показано [25], что из существующих комет с полным основанием может быть выделена лишь одна группа, члены которой, по-видимому, действительно происходят от большой общей родительской кометы. Это группа из 6—8 «царапающих Солнце» комет, описанных Марсденом [14]. Очевидно, причиной деления явилось действие солнечных приливов. Разрушение кометы в этом случае должно быть очень основательным. Тем не менее фрагменты такой кометы, по-видимому, ничем не отличаются от обычных «малых» комет. Поскольку родительские кометы должны быть существенно больше других наблюдаемых комет [18], их ядра должны нагреваться весьма сильно, если такой нагрев в кометах вообще имеет какое-то значение. Отсутствие проявлений каких-либо особенностей в указанном семействе близких к Солнцу комет является сильным аргументом против утверждения о том, что ядра комет могут содержать астероидоподобную сердцевину.

Замечательный пример дробления кометы представлен на снимках рис. 9, где показано, как комета Веста разделилась на четыре фрагмента. К сожалению, применение классической теории движения по орбитам к отдельным фрагментам не позволяет представить их относительные перемещения с точностью, сравнимой с точностью наблюдений. В своем прекрасном исследовании Секанина [20] смог объяснить данные 12 наблюдений из 13, предположив, что между отдельными компонентами действуют радиальные негравитационные силы, создаваемые реактивным эффектом выбрасываемых вследствие сублимации газов. Он нашел, что фрагменты разделяются вначале с исключительно малыми скоростями, составляющими несколько сантиметров, максимум 1—2 м/с. Величина этих сил составляет всего лишь

---

<sup>1)</sup> Хотя взаимно однозначную связь между метеорными потоками и распадом комет нельзя считать окончательно установленной, в некоторых случаях, например у потока Драконид, такая связь прослеживается с большой вероятностью. — *Прим. ред.*



Рис 9. Дробление ядра кометы Веста (1976 VI) в период с марта 8,5 (слева) до марта 24,5 1976 (справа). Наибольшее разделение фрагментов (март 24,5) составляло 16,3". (А. С. Меррилл и С. Ф. Кнаклс, Университет шт. Нью-Мексико.)

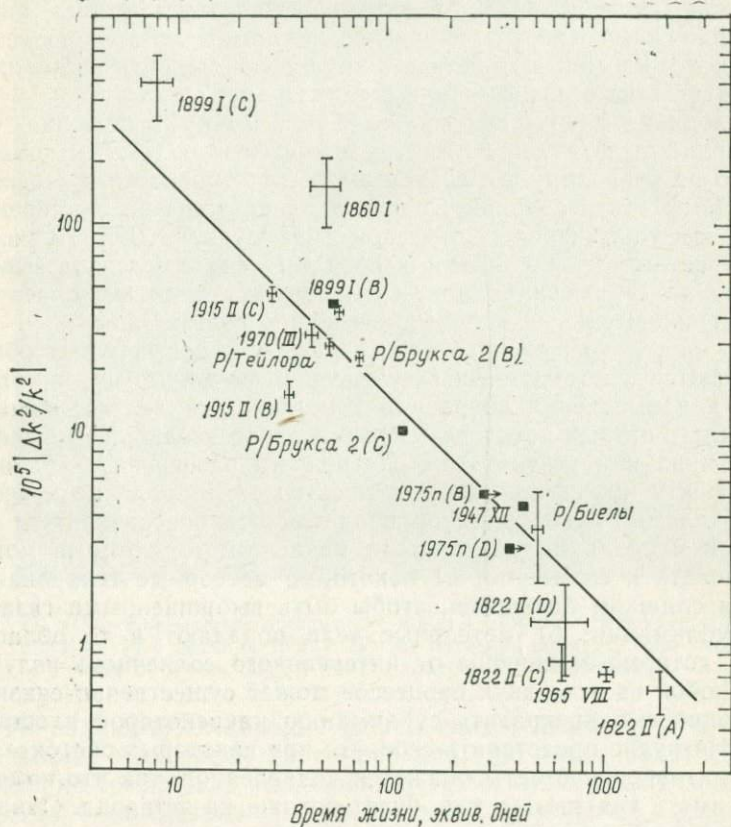


Рис. 10. Отклонения от силы гравитационного притяжения Солнца (единица —  $10^{-6}$ ) в зависимости от продолжительности жизни (в эквивалентных днях при расстоянии 1 а. е.) для фрагментов разделившихся комет (Ц. Секанина).

$10^{-5}$ — $10^{-3}$  от силы солнечного гравитационного притяжения в зависимости от времени существования фрагментов. Полученная хорошая корреляция иллюстрируется рис. 10, где показано отклонение от силы притяжения Солнцем в зависимости от времени существования фрагментов, выраженного в эквивалентных днях (поток энергии соответствует расстоянию 1 а. е. от Солнца). График свидетельствует о том, что фрагменты с коротким временем жизни приобретают более высокие ускорения по сравнению с крупными фрагментами (которые существуют долго), так что одна прямая представляет эту зависимость с малыми отклонениями.

На рис. 10 отмечены три короткопериодические кометы, две с близкими к Солнцу траекториями, две с периодами  $P$ , равными 3700 и 80 000 лет, две почти новые, одна новая и одна с параболической траекторией. Фрагментам соответствует весьма широкий диапазон возрастов родительских комет, но их поведение одинаково. На мой взгляд, здесь трудно обнаружить какие-либо доказательства стратификации в ядрах комет.

Исходя из физических соображений, Донн [3] показал, что отношение пыль/газ значительно меняется от кометы к комете, однако не коррелирует с возрастом комет. Фельдман и его коллеги (см. этот сборник) провели спектральные измерения в дальнем ультрафиолете трех комет со спутника IUE. Периоды комет составляли 300, 3000 и 500 000 лет. Можно сделать вывод, что любая стратификация при умеренных толщинах слоев не создает значительных изменений в общем составе комет.

Тот факт, что в кривых блеска старых и новых комет обнаруживаются систематические различия, по-видимому, несуществен для выяснения вопроса о том, является ли пониженная активность старых комет результатом действительной стратификации ядра или результатом внутреннего разогрева. К такому же эффекту может приводить и простое экранирование метеорными телами. Такое экранирование может обеспечиваться по крайней мере двумя различными механизмами, которые могут действовать и совместно: а) некоторые метеорные тела оказываются слишком большими, чтобы быть выброшенными газами при сублимации; б) метеорные тела попадают в те области комет, которые защищены от интенсивного солнечного излучения. Любой из этих двух процессов может существенно снизить или полностью прекратить сублимацию на некоторой площади ядра. Нетрудно представить себе, что при некоторых обстоятельствах активность кометы окажется подавленной, так что комета будет иметь вид звезды, т. е. будет похожа на астероид. Однако столкновения с межпланетными частицами рано или поздно реактивируют ее, так что время существования такого тела гораздо меньше, чем для астероида.

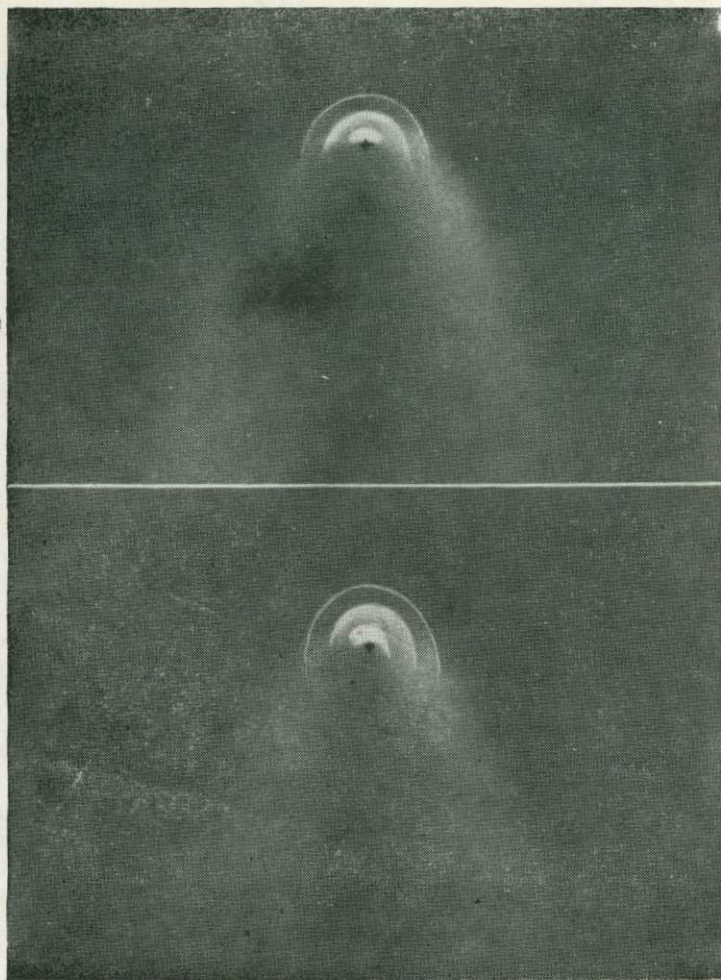


Рис. 11. «Параболические» оболочки у кометы Донати (1858 VI). Вверху — 4 октября, внизу 5 октября 1858 г. В этот интервал времени было выброшено пять оболочек. (Г. П. Бонд, Гарвардская обсерватория.)

По-видимому, некоторые факты свидетельствуют о реальности обоих этих видов экранирования. По моим данным, ядра примерно трети, если не половины, ярких комет всех возрастных классов несимметричны в отношении проявлений активности. Классическими примерами являются кометы Донати (1858 VI) (рис. 11) и Коггина (1874 III). Временами каждая из этих комет сбрасывала «параболические» оболочки с регулярностью на-

столько точной, насколько вообще мог быть измерен характерный размер такой «параболы». Периоды сброса оболочек составляли соответственно 4,62 и 9,2 ч [27, 28]. Единственное рациональное объяснение заключается в том, что на ядре кометы имелась площадка, попадание которой под солнечный свет вызывало при каждом обороте ядра мощную сублимацию, сопровождаемую выбросом газов. Остальная поверхность этих ядер была относительно менее активна — можно предположить, например, что она была закрыта метеорными телами или состояла преимущественно из нелетучих материалов. Изучив примерно 80 хорошо наблюдаемых комет, я обнаружил, что около трети из них были несимметричны, что позволяло определить периоды их вращения.

Асимметрия другого рода отмечается у большинства ярких комет, таких, например, как комета Галлея. Для этой кометы удалось получить снимки области, близкой к ядру, при высоком разрешении. Как показано на рис. 12, из ядра кометы исходят широкие и узкие выбросы и струи. Подробно исследуя комету Свифта — Тутля (1862 III), Секанина [21] сделал вывод, что эти близкие к ядру короткоживущие структуры представляют собой пылевые потоки. Они свидетельствуют о том, что даже в старых кометах могут существовать небольшие площадки, проявляющие высокую активность. Это опять-таки наводит на мысль, что пониженная активность остальной площади ядра может быть обусловлена ее полным или частичным экранированием. С другой стороны, допустимо и такое объяснение: возможно, в кометах часто встречаются небольшие вкрапления высоколетучих льдов. Оба объяснения не исключают друг друга.

Предположение о том, что такое экранирование возможно, позволило дать одно из объяснений поведения периодической кометы Энке. В работе [29] был выполнен расчет, показавший, как постепенно в течение примерно 200 лет со времени открытия этой кометы менялось ее негравитационное движение (рис. 13). Прецессия ее полюса вращения, вызванная реактивным действием сублимации слегка сплюснутого ядра, в сочетании с 45°-ным отставанием области максимальной сублимации от подсолнечной точки определяет изменение периода, показанное на рис. 13. Рассчитанное таким образом движение полюса кометы показано на рис. 14. Кривая блеска периодической кометы Энке аномальна в том смысле, что комета достигает наибольшей яркости задолго до прохождения перигелия и становится ненаблюдаемой вскоре после него. Это явление обусловлено недостатком активности одной из полярных областей. Экстраполируя движение кометы на период до ее обнаружения в 1786 г., мы рассчитали, что полюс ее оставался неподвижным в течение многих оборотов — нескольких сотен и даже больше.



Рис. 12. Рисунок области ядра кометы Галлея, сделанный в 1910 г. (Р. Т. А. Иннес, Трансваальская обсерватория.)

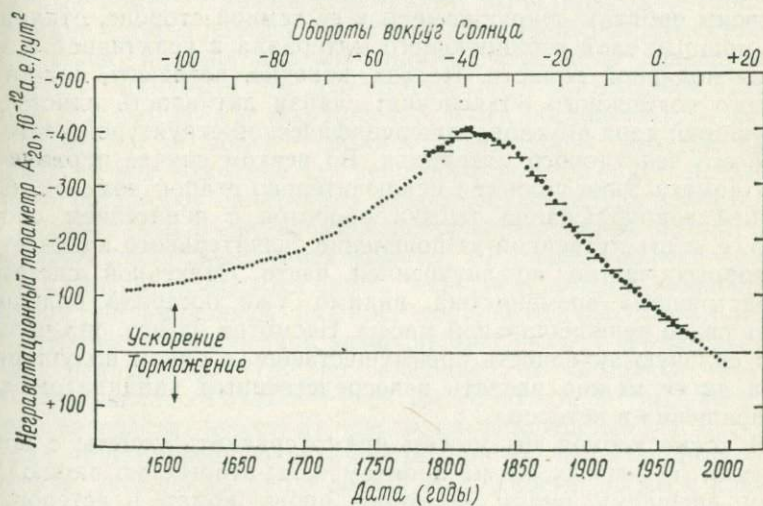


Рис. 13. Отклонения кометы Энке от ньютоновского закона движения. Черточки — измеренные средние за несколько оборотов величины, точки — расчет. Максимальное укорочение периода в 3,3 года составляло около 100 мин за период.

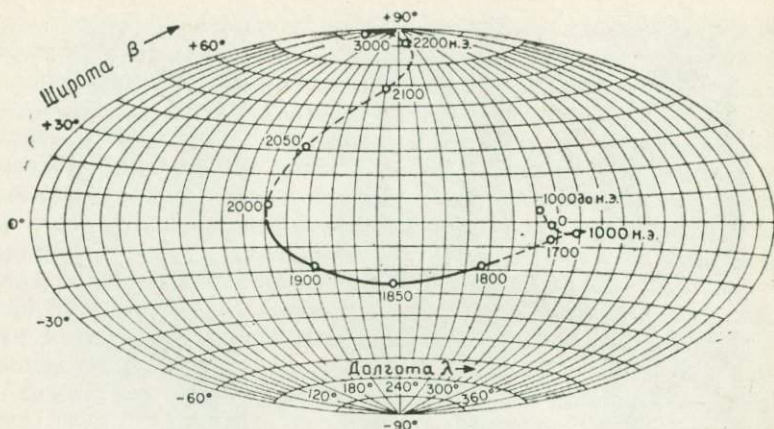


Рис. 14. Рассчитанное движение северного полюса кометы Энке на небесной сфере в период с 1000 года до н. э. по 3000 года н. э. Сплошная линия — измеренные значения, пунктир — экстраполяция.

В течение этого периода неактивный сейчас полюс был ориентирован вблизи точки перигелия по направлению от Солнца и, значит, получал мало солнечной энергии. По нашему мнению, это привело к экранированию неактивного полюса большими метеорными телами, которые были подняты с поверхности активных областей, но не удалились от кометы. Они двигались затем по своим орбитам вокруг кометы к ее темной стороне, откладывая мощный слой изолирующего материала в неактивной в это время полярной области. Нельзя, конечно, возразить и против другого возможного объяснения: слабая активность одного из полушарий ядра обусловлена специфической структурой слагающего его неактивного материала. Во всяком случае периодическая комета Энке является исключительно старой кометой, сделавшей вокруг Солнца тысячи оборотов с перигелием около 0,3 а. е. и ответственной за появление значительного количества метеорных частиц во внутренней части Солнечной системы. К настоящему времени она, видимо, уже потеряла большую часть своей первоначальной массы. Несмотря на это, она проявляет сильную активность преимущественно в одном полушарии. Едва ли ее можно назвать непосредственным кандидатом для превращения в астероид.

В конце концов мы можем прямо сравнить кометы с астероидами, во-первых, по их орбитам и, во-вторых, по наблюдаемому внешнему виду. Эволюция орбит комет и астероидов достаточно сложна, и для знакомства с этими вопросами можно рекомендовать работы [12, 17, 19, 23]. Сведения об орбитах и теоретические соображения заставляют предположить, что

«умершие» кометы должны занять свое место среди астероидов группы Аполлона (пересекает орбиту Земли) и Амура (с перигелием вблизи Земли), если каждая двадцатая комета может стать астероидом [19]. Уэзерилл [23] указал, однако, что столкновения астероидов, связанные с возмущениями Юпитером в резонансах шестого и более высокого порядка, возможно, поддерживают запас астероидов в группах Аполлона и Амура. Исследование Уэзерилла в какой-то мере облегчает решение вопроса о возможности замены этих относительно мало живущих астероидов кометами. Возможно, будущая теория покажет, что количество астероидов может самоподдерживаться.

Другими астероидами кометного происхождения могут оказаться Гидальго и Хирон — они действительно движутся по тем же орбитам, что и кометы; далее, это астероиды Троянцы, движущиеся по орбите Юпитера, № 2212 (1978 SB), движущийся по орбите, сходной с орбитой кометы Энке, и некоторые другие группы астероидов. Однако сведения об орбитах и теория не дают в настоящее время четкого критерия, позволяющего утверждать, что те или иные астероиды имеют кометное происхождение.

На эти основные вопросы не могут дать ответа и сравнительные фотометрические исследования ядер комет и астероидов (см., например, [1, 8]).

Итак, если не считать сопоставлений кривых блеска старых и новых комет, а также того факта, что старые короткопериодические кометы постепенно исчезают на умеренных расстояниях от Солнца, налицо, как мы видим, очень мало доказательств в пользу гипотезы о том, что кометы могут становиться астероидами. Однако, по мнению Кресака, и эти обстоятельства не свидетельствуют в пользу упомянутой гипотезы. Другие факты ставят ее под сомнение: а) некоторые кометы после исчезновения не оставляют неактивных ядер сколько-нибудь значительного размера, и в то же время некоторые метеорные потоки представляют собой «умершие» кометы; б) разделившиеся кометы, в том числе и проходящие в непосредственной близости от Солнца, не проявляют никаких дополнительных особенностей; в) активность фрагментов разделившихся комет свидетельствует о внутренней структуре, не зависящей от «возраста» кометы; г) соотношение газ/пыль и спектры не позволяют получить критерий «возраста» комет; д) некоторые небольшие области старых комет имеют высокую активность, причем неоднородная, «пятнистая» активность наблюдается, в сущности, во всех кометах, хотя и проявляется в большей мере у старых комет.

Никаких окончательных доказательств существования в кометах ядер астероидного типа нет. В частности, их не дает и семейство комет, очень близко подходящих к Солнцу и имею-

ших, вероятно, одну родительскую комету — самую большую по сравнению с теми, которые мы знаем. Однако приведенного примера недостаточно, и вероятность того, что малая доля комет может иметь астероидные ядра, нельзя считать исключенной. Очень может быть, что для объяснения различий между старыми и новыми кометами нужно учитывать экранирование метеорными телами. Наличие экранирующего эффекта, по-видимому, можно считать установленным. Исходя из достигнутого уровня наших представлений, предположение о существовании астероидных ядер в некоторых кометах следует принять в качестве специальной гипотезы, никоим образом не опровергнутой.

### Литература

1. *Degewij J.* Workshop on Modern observational Techniques for Comets, Goddard Space Flight Center, in press, 1981.
2. *Donn B.* The Study of Comets, NASA SP-393, 1976, p. 611.
3. *Donn B.* Comets, Asteroids, Meteorites, ed. A. H. Delsemme, Univ. Toledo, 1977, p. 15.
4. *Everhart E.* Astron. J., 72, 716, 1002, 1972.
5. *Everhart E.* Astrophys. Let., 10, 131, 1973.
6. *Everhart E.* The Study of Comets, NASA SP-393, 1976, p. 445.
7. *Feldman P. D.* См. данный сборник.
8. *Gradie J.* Workshop on Modern Observational Techniques for Comets, Goddard Space Flight Center, in press, 1981.
9. *Irvine W. M., Leschine S. B., Schloerb F. P.* Nature, 283, 748, 1980.
10. *Kresák L.* Bull. Astr. Inst. Czeck., 24, 264, 1973.
11. *Kresák L.* Bull. Astr. Inst. Czeck., 28, 346, 1977.
12. *Kresák L.* The Moon and the Planets, 22, 83, 1980.
13. *Lee T., Papanastassiou D. A. and Wasserburg G. J.* Geophys. Res. Lett., 3, 109, 1976.
14. *Marsden B. G.* Astron. J. 72, 1170, 1967.
15. *Marsden B. G., Sekanina Z.* Astron. J. 78, 1118, 1973.
16. *Opal C. B., Carruthers G. R., Pinz D. K. and Meier R. R.* Science, 185, 702, 1974.
17. *Opik E. J.* Advan. Astron. Astrophys., 2, 219, 1963.
18. *Opik E. J.* Irish Astron. J., 7, 141, 1966.
19. *Rickman H., Froeschlè C.* The Moon and the Planets, 22, 125, 1980.
20. *Sekanina Z.* Icarus, 30, 547, 1977; 33, 173, 1978; 38, 300, 1979.
21. *Sekanina Z.* Ann. Rev. Astr. and Astrophys., Vol. 19, 1981 (in press).
22. *Wallis M. K.* Nature, 284, 431, 1980.
23. *Wetherill G. W.* Icarus, 37, 96, 1979.
24. *Whipple F. L., Stefanik R. P.* Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, Ser. 5, 33, 1966.
25. *Whipple F. L.* Icarus, 30, 736, 1977.
26. *Whipple F. L.* The Moon and the Planets, 18, 343, 1978.
27. *Whipple F. L.* Nature, 273, 134, 1978.
28. *Whipple F. L.* The Moon and the Planets, 19, 305, 1978.
29. *Whipple F. L., Sekanina Z.* Astron. J., 84, 1894, 1980

# Ядра комет: характеристики и гипотезы о происхождении и строении

Б. Донн<sup>1)</sup>

В этом сообщении, дополняя превосходный обзор Уиппла о природе комет, я хотел бы кратко рассмотреть некоторые их спектроскопические свойства. Вопрос об их исследовании возникает в связи с проблемой, касающейся облучения комет космическими лучами за долгое время их существования в облаке Оорта. Более детальный анализ этого явления, включая экспериментальное исследование облучения льда протонами с энергией 1 МэВ, был выполнен Марлой Мур. В заключительном разделе сформулированы гипотезы о происхождении и структуре ядер.

## I. Спектроскопическая классификация комет

Кометы по их спектрам [14] делятся на три большие категории: 1) с преобладанием континуума, 2) с преобладанием молекулярных эмиссий и 3) содержащие в основном спектр  $\text{CO}^+$ . К категории 3 можно уверенно отнести кометы Морхауза (1908 III) и Хьюмаса (1962 VIII), а также, по-видимому, несколько более ранних комет. Эта классификация основывается только на спектрах видимого диапазона, поскольку ракетных и спутниковых спектров слишком мало, чтобы ввести какую-либо градацию. Спектры типов 1 и 2 показаны на рис. 1. Спектр типа 3 кометы Морхауза показан на рис. 2.

Сравнение между собой имеющихся кометных спектров наталкивается на серьезные трудности двоякого рода. С тех пор как спектроскопия комет начала развиваться в конце девятнадцатого столетия, техника наблюдений претерпела значительные изменения. Усложнения задач требовало применения все более разнообразной аппаратуры; использовались объективные призмы, низко- и высокодисперсионные щелевые спектрографы, сканирующие фотоэлектрические, а теперь и электронные устройства, позволяющие строить изображения спектров. Применение разных инструментов приводило к различию получаемых спектров.

Вторая трудность заключается в относительном увеличении интенсивности континуума по сравнению с интенсивностью эмиссий, когда гелиоцентрическое расстояние увеличивается. Эту

<sup>1)</sup> Лаборатория веземной физики, Центр космических полетов им. Годдарда, Гринбелт, шт. Мэриленд 20771, США.

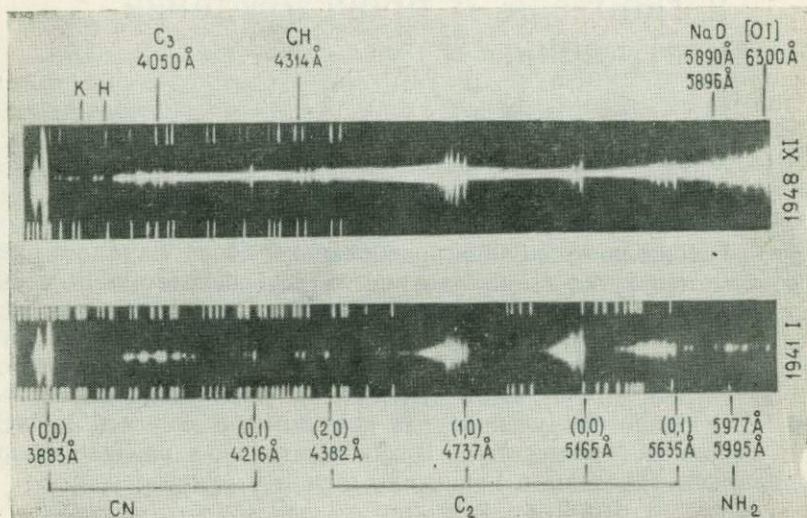


Рис. 1. Спектры кометы с сильным (вверху) и слабым (внизу) континуумом [14].

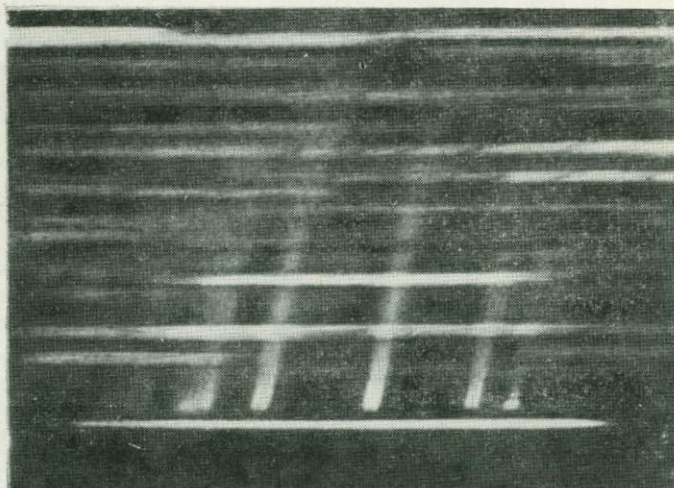


Рис. 2. Спектр, полученный с объективной призмой для кометы Морхауза (1908 III), представляет собой почти чистый спектр иона  $CO^+$  в коме и хвосте (Ф. Бальде).

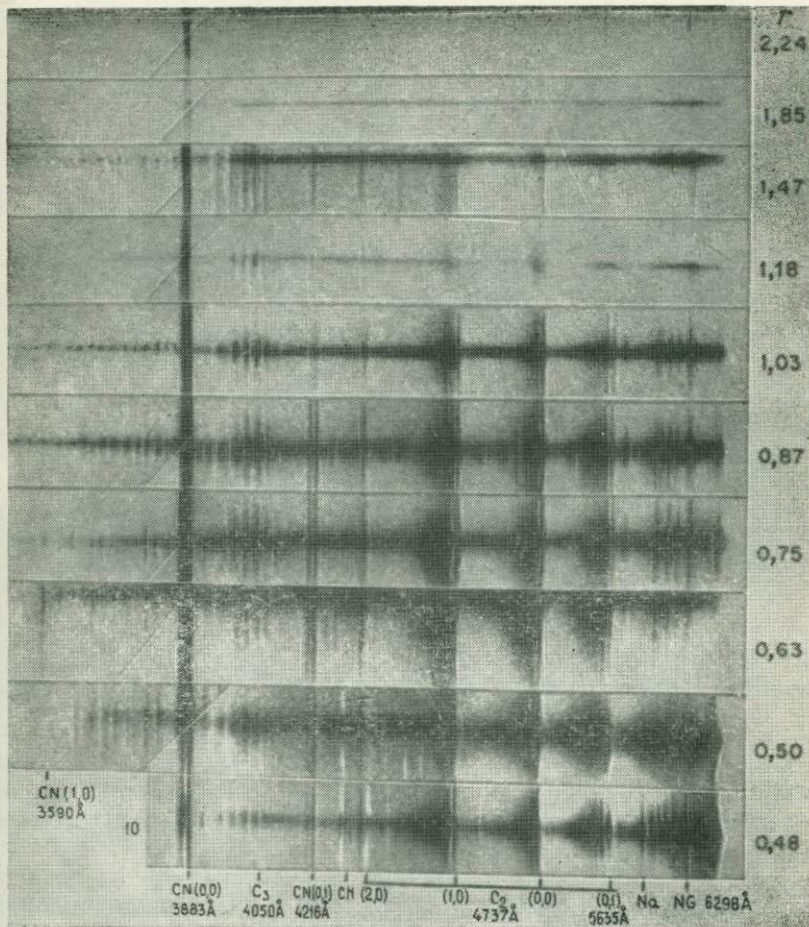


Рис. 3. Зависимость отношения континуум/эмиссии от гелиоцентрического расстояния  $r$ . Показаны доперигелийные спектры кометы 1971 I [14].

особенность иллюстрирует рис. 3. Следовательно, в описание спектра следует включать данные о гелиоцентрическом расстоянии, на котором этот спектр получен.

Обе эти проблемы должны быть решены в будущих исследованиях. Сейчас в соответствии с определенными программами наблюдений кометные спектры измеряются в возможно более широком интервале расстояний. Каждая такая программа использует различные методы — фотографию с умеренным разрешением, фотоэлектрическое сканирование, построение электрон-

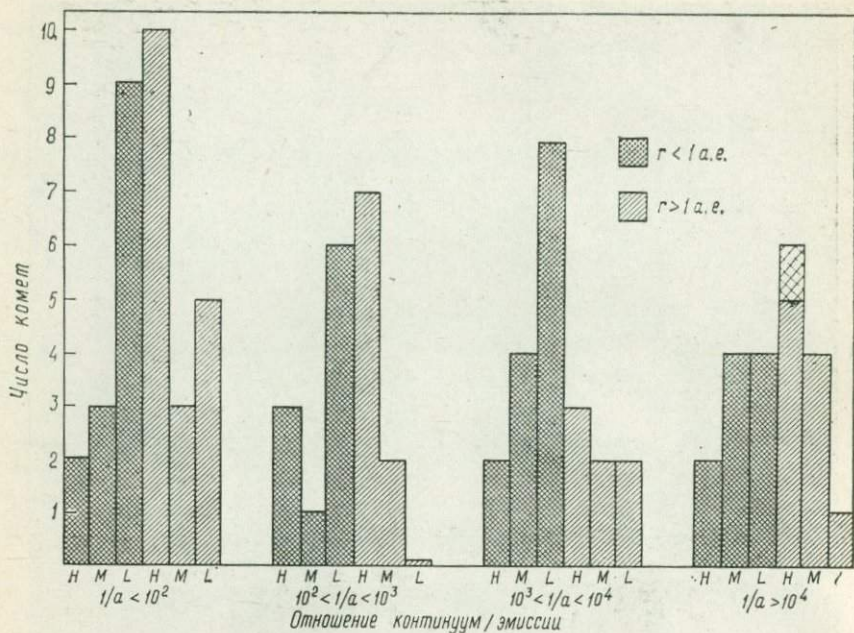


Рис. 4. Гистограмма отношений континуум/эмиссии для четырех «возрастных» групп комет. Величина  $1/a$  приведена в единицах  $10^{-6}$  (а. е.) $^{-1}$ . (H — высокое, M — среднее, L — низкое отношение.)

ных изображений. Эти программы могут давать однородный материал, пригодный для интерпретации изменений в спектрах, а также для сопоставления результатов различных способов наблюдений.

Исследования 85 комет, наблюдавшихся с помощью различной аппаратуры в период с 1865 по 1975 г., были проанализированы [4], чтобы выделить в них изменения с «возрастом» комет. Этот «возраст» обычно измеряется обратной величиной большой полуоси  $a^{-1}$ . Новые кометы приходят из облака Оорта, имея  $a^{-1} < 100 \cdot 10^{-6}$  (а. е.) $^{-1}$ . При последовательных проходах Солнечной системы величина  $a^{-1}$  увеличивается. В среднем большие значения  $a^{-1}$  имеют кометы, сделавшие больше проходов через свой перигелий, что, собственно, и является мерой «возраста» кометы. На рис. 4 показана зависимость отношения континуум/эмиссии от этого «возраста». Поскольку это отношение зависит от гелиоцентрического расстояния, все данные были разделены на две группы — соответственно тому, было ли это расстояние больше или меньше 1 а. е.

Во всех возрастных группах, как видим, эта зависимость носит сходный характер. Для комет с гелиоцентрическим рас-

стоянием, меньшим 1 а. е., чаще наблюдаются малые отношения континуум/эмиссии, а при расстоянии свыше 1 а. е. эти отношения в основном велики. Принимая во внимание возможные ошибки измерений, можно сделать вывод, что в ходе эволюции комет качественных изменений в кометных спектрах не наблюдается. Этот результат, имеющий отношение к внутреннему строению кометных ядер, рассмотрен в разд. IV.

## II. Органические молекулы в кометах

В спектрах комет (рис. 1) присутствуют сильные полосы CN, C<sub>2</sub> и C<sub>3</sub>. Несколько менее выделяются полосы CH. Анализ ультрафиолетового спектра, данный Фельдманом в настоящей книге, указывает на высокое содержание атомов углерода в коме. Эти измерения являются весомым свидетельством в пользу того, что в ядре комет имеются разнообразные органические молекулы. Недавно было высказано предположение о том, что химические реакции в коме могут быть главным источником наблюдаемых и ненаблюдаемых компонентов в спектрах комет (например, [8]). Однако устойчивое наличие CN, C<sub>2</sub> и особенно C<sub>3</sub> на расстояниях порядка 3 а. е. дает основание считать, что в ядре существуют органические молекулы, так что эти радикалы не образуются реакциями в коме.

Свидетельство об этом, хотя и менее четкое, дает идентификация молекул в микроволновых спектрах комет. Сообщалось о трех таких молекулах — HCN [7], CH<sub>3</sub>CN [15] в комете Когоутека (1974) и H<sub>2</sub>O в комете Брэдфилда (1975) [9]. Так как каждая из этих молекул наблюдалась в микроволновом спектре только одной какой-либо кометы, а поиски в других были безрезультатны, то их радиообнаружение нельзя считать хорошо установленным. Как показано Фельдманом, поиски родительской молекулы с необходимостью приводят к выводу о наличии в кометах молекулы H<sub>2</sub>O. Ее обнаружение в спектре радиоизлучения осуществляется по линии, связанной с возбужденным состоянием молекулы, как и в случае молекулы CH<sub>3</sub>CN. Трудность состоит в том, что при низких плотностях комы, составляющих 10<sup>13</sup>—10<sup>8</sup> см<sup>-1</sup>, меняются условия возбуждения. В случае HCN наблюдается линия основного состояния, ее эпизодическую регистрацию объяснить труднее. В следующем разделе будет рассмотрен вопрос об образовании сложных молекул в условиях облучения космическими лучами облака Оорта.

## III. Облучение космическими лучами в облаке Оорта

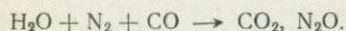
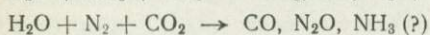
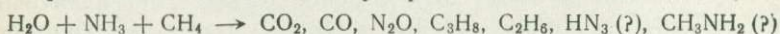
В некоторых работах было рассмотрено облучение космическими лучами солнечного [13] или галактического происхождения [3, 17]. Такое облучение, как известно, приводит к значи-

тельным химическим изменениям при достаточном времени экспозиции. Солнечные космические лучи не создают значительного количества вещества в кометах, разве что во время очень интенсивных вспышек. Для галактических космических лучей, в потоках которых кометы находятся в течение миллиардов лет, химические эффекты будут заметны вплоть до глубин в несколько метров [3].

В [17] было высказано предположение, что лед при облучении становится более активным в химических реакциях и неустойчивым, в то время как в [3] предполагалось, что разрывы насыщенных связей в поверхностных слоях могут способствовать полимеризации и потемнению вещества наружных слоев новых комет. Для исследования такого процесса в облучаемых льдах в Годдардовском центре была разработана программа эксперимента с использованием протонов с энергией 1 МэВ, получаемых на ускорителе Ван-де-Граафа. Этот эксперимент был выполнен Марлой Мур в качестве диссертационной работы на степень доктора философии в рамках астрономической программы Мэрилендского университета. Подробно она опубликована в другом месте.

Максимальное облучение составляло 0,1 от рассчитанных экспозиций в облаке Оорта. Получены следующие результаты.

1. Образовались новые молекулярные компоненты:



2. Во время облучения при температуре 12 К прозрачная или белая пленка окрашивалась.
3. Наблюдалось выделение газа, по-видимому, водорода, при нагреве до 20 К.
4. Во время нагрева наблюдалась хемилюминесценция и увеличивалось давление.
5. СО становилась менее летучей после облучения ледяной смеси.
6. После нагревания до комнатной температуры во всех случаях выделялся остаток.

Экспериментальные исследования в настоящее время продолжаются.

#### IV. Происхождение и структура ядер комет

Спектры комет, которые были рассмотрены в разд. I и II, показывают, что ядро составлено из летучих материалов. Следовательно, облако, из которого образовались кометы, существовало при низкой температуре, а аккумуляция вещества проис-

ходила при малых относительных скоростях и энергиях столкновений в любом месте облака. Вследствие малых масс комет ( $10^{16}$ — $10^{18}$  г) гравитационный захват газов не мог иметь места. Распространенная точка зрения [6, 5, 16], что небольшие твердые пылинки важны для появления гравитационной неустойчивости, согласуется с гипотезой аккреции комет из небольших пылинок [1].

Детальные исследования процесса аккумуляции планетезималей до планетных объектов были выполнены в работах [11, 5]. Сравнительно недавно был опубликован обзор [16] по этой тематике. Исследование процесса аккумуляции показало, что распределение размеров планетезималей должно быть таким, как это показано на рис. 9 в работе [5]. Весьма вероятно, что процесс формирования комет может быть аналогичным при много меньших масштабах конечных объектов — их размеры составляют всего километры. В соответствии с результатами работы [5] это должно свидетельствовать о том, что ядра комет представляют собой агломераты кометезималей с распределением размеров, подчиняющимся закону  $n(m) \propto m^{-5}$ . На рис. 5 я попытался изобразить такое ядро.

Описание физических процессов аккумуляции ледяных зерен было дано в работе [2]. В этой работе описана внутренняя структура образования, возникающего в результате агломерации. В объектах размером 1 км и плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  давление в центре будет составлять  $10^3 \text{ дин/см}^2$ . Для более мелких кометезималей, составляющих ядро кометы, следует ожидать меньших плотностей, а сами структуры будут более хрупкими.

Кометезимали могут соединяться, образуя ядро, только некоторыми частями своих поверхностей; поэтому они будут скрепляться очень слабо. Отдельные части могут легко отрываться от испаряющихся вращающихся ядер. Более крупные куски становятся видными как малые кометы, оторвавшиеся от первоначального ядра, и каждый такой обломок имеет все характерные черты малой кометы. Поведение кометы, делящейся на фрагменты, происходит в соответствии с этой моделью так, как описано в работе [12]. Хотя представленная модель структуры ядра построена способом, отличным от описания Уиппла [18], она приводит к картине, в чем-то похожей.

Несжатое ядро, имеющее небольшую плотность и состоящее в основном из смеси льдов, не может нагреться внутри сколь угодно значительно. В табл. 1 указаны тепловые характеристики для предполагаемых или вероятных кометных льдов. Молекулы всех этих веществ создают заметные давления пара в точках плавления — от 4 мм рт. ст. для воды до 1 атм для ацетилена. В точке плавления водяного льда все указанные в табл. 1 газы испаряются. Расплавившаяся внутренняя часть должна стано-

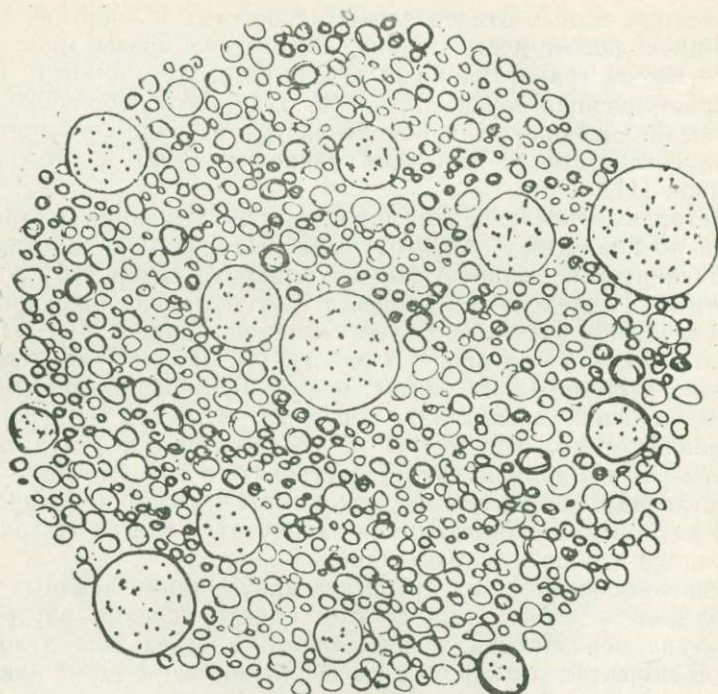


Рис. 5. Предполагаемая модель кометного ядра. Круговые области представляют большие кометизимали. Остальной объем заполнен очень малыми агрегатами льда и пыли.

виться полостью, давление газа в которой значительно превышает давление внешней оболочки, если размер не превосходит 10 км.

Таблица 1

Тепловые свойства конденсированных газов

Молекулы	Точка кипения, К	Точка плавления, К	$P_{\text{пар}}$ мм рт. ст.
CO	82	74	280
CH <sub>4</sub>	112	91	90
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	189	192	>760
CO <sub>2</sub>	195	—	—
NH <sub>3</sub>	240	196	45
H <sub>2</sub> O	373	272	4
HCN	299	260	130

Плавление поверхностного материала будет приводить к быстрому испарению, охлаждению и, вероятно, к замораживанию. Вряд ли плавление небольшой кометы может привести к развитию химических реакций или другим явлениям.

## Литература

1. *Biermann L., Michel K. W.* On the Origin of Cometary Nuclei in the Pre-Solar Nebula, *The Moon and Planets*, **18**, 447, 1978.
2. *Donn B.* *Icarus*, **2**, 396, 1963.
3. *Donn B.* In: *The Study of Comets*, NASA SP-393, ed. by *B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn and R. Harrington*, NASA/GSFC, Washington, D. C., 611, 1976.
4. *Donn B.* In: *Comets, Asteroids, Meteorites*, ed. *A. H. Delsemme*, University of Toledo, Toledo, Ohio, 15, 1977.
5. *Greenberg R., Wacker J. F., Hartman W. K., and Chapman C. R.* *Icarus*, **35**, 1, 1978.
6. *Hartman W. K., Greenberg R., Cameron A.* In: *Protostars and Planets*, ed. *T. Gehrels*, University of Arizona Press, 1978.
7. *Huebner W. F., Snyder L. E., Buhl D.* *Icarus*, **23**, 580, 1974.
8. *Huebner W. F.* См. данный сборник.
9. *Jackson W. M., Clark T., Donn B.* In: *The Study of Comets*, NASA, ed. *B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn and R. Harrington*, Washington, D. C., 272, 1976.
10. *Marsden B. G., Sekanina Z.* *Astron. J.*, **78**, 118, 1973.
11. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.
12. *Sekanina Z.* *Icarus*, **30**, 574, 1977.
13. *Shulman L. M.* In: *Motion, Orbital Evolution and Origin of Comets*, *G. A. Chebotarev, E. I. Kazimirchak — Polonskaya and B. G. Marsden*, ed., D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 264, 1972.
14. *Swings R., Haser L.* *Atlas of Cometary Spectra*, Liège, 1975.
15. *Ulich B. L., Condin E. K.* *Nature*, **248**, 121, 1974.
16. *Whetherill G. W.* *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **18**, 77, 1980.
17. *Whipple F. L.* In: *Comets, Asteroids, Meteorites*, ed. *A. H. Delsemme*, University of Toledo, Toledo, Ohio, 1977, p. 25.
18. *Whipple F. L.* In: *The Moon and the Planets*, **18**, 343, 1978.

# Исследования спектров комет в ультрафиолете

П. Д. Фельдман<sup>1)</sup>

Исследования спектров комет в ультрафиолетовом диапазоне являются мощным средством изучения кометных атмосфер, поскольку четыре основных компонента, наблюдаемые в кометах, — Н, С, N и О, а также некоторые простые молекулы, содержащие эти элементы, имеют сильные резонансные переходы в ультрафиолетовой области спектра. Однако такие наблюдения из-за непрозрачности атмосферы для ультрафиолета должны выполняться с космических аппаратов. Вплоть до 1970 г. таких исследований не проводилось. В 1970 г. наблюдения в космосе позволили обнаружить у комет Таго—Сато—Косака и Беннета огромные области излучения в линии  $\text{H I } L\alpha$ , заметные вследствие рассеяния солнечных фотонов линии  $L\alpha$  водородом, образующимся при разрушении молекул воды кометы. В 1974 г. при ракетных наблюдениях кометы Когоутека были обнаружены углерод и кислород, однако измерения в широком спектральном интервале (от 1150 до 3100 Å) были проведены лишь впоследствии — для комет Веста (1976 VI), Сарджента (1978 XV) и Брэдфилда (1979 X). Наблюдения кометы Брэдфилда, выполненные с помощью спутника IUE, впервые охватили широкий диапазон гелиоцентрических расстояний — от 0,7 до 1,5 а. е. Обзор результатов этих наблюдений показывает их вклад в наше понимание химических и физических процессов в коме, а также в наши представления о составе кометного льда.

## Введение

В последнее десятилетие наблюдения комет в вакуумном ультрафиолете внесли существенный вклад в наши представления о комах и ядрах комет. Первые наблюдения в ультрафиолете кометы Беннета (1920 II), проведенные в 1970 г. со спутников OAO-2 и OGO-3, показали наличие водородных оболочек, простирающихся на миллионы километров от ядра кометы [1, 3]. Исследования этих областей, излучающих линию  $\text{H I } L\alpha$  и сопутствующую сильную линию эмиссии  $\text{OH } (\lambda = 3090 \text{ Å})$  (слабо видимую при наземных спектральных наблюдениях),

<sup>1)</sup> Отдел физики Университета Джона Гопкинса, Балтимор, шт. Мэриленд 21218, США.

дают важные подтверждения справедливости модели Уиппла для кометы как конгломерата льдов, предложенной два десятилетия назад [23, 24] на основе отмеченных возмущений кометных орбит нецентральными силами. Наблюдаемые эмиссии можно объяснить фотодиссоциацией солнечным излучением воды, испаряемой с поверхности «грязного снежного кома». Вычисленная скорость образования молекул  $H_2O$  (типичное значение  $10^{29}$ — $10^{30}$  молекул в секунду) точно предсказывалась моделью Уиппла [1, 14]. В линии  $L\alpha$  комета Таго — Сато — Косака (1969 IX) наблюдалась на двух упомянутых выше космических обсерваториях (ОАО-2 и ОГО-3) [15] и в ракетном эксперименте [13].

Следующая благоприятная возможность наблюдения кометы в вакуумном ультрафиолете появилась с кометой Когоутека (1973 XII), которая была обнаружена за 10 месяцев до прохождения ею перигелия, что побудило к проведению координированной программы космических и наземных наблюдений. В УФ-спектрах, снятых в двух ракетных экспериментах [4, 19], были обнаружены атомный кислород и углерод. В другом ракетном эксперименте [18] и в наблюдениях с космической станции «Скайлэб» [2] было получено прямое изображение водородной оболочки кометы по излучению линии  $L\alpha$ . То, что предполагалось получить в наблюдениях кометы Когоутека, было реализовано двумя годами позднее при наблюдениях кометы Веста (1976 VI), когда ракетная аппаратура, разработанная для наблюдений кометы Когоутека, была использована для получения первых спектров кометы в широком диапазоне ультрафиолета [5, 21].

Космическая обсерватория для наблюдений в ультрафиолетовой области IUE (International Ultraviolet Explorer) была выведена на орбиту в январе 1978 г. и продолжает хорошо функционировать по сей день. С 1976 г. не наблюдалось каких-либо новых комет, сравнимых по размерам с кометами Беннета или Веста, так что исследователям, имевшим возможность использовать аппаратуру для проведения наблюдений в ультрафиолете на спутнике IUE, пришлось довольствоваться двумя меньшими кометами — Сарджента (1978 XV) в 1978 г. [12] и Брэдфилда (1979 X) в 1980 г. [8]. Наблюдения кометы Брэдфилда на спутнике IUE были первыми, проведенными в широком диапазоне гелиоцентрических расстояний — от 0,7 до 1,55 а. е.

### Ультрафиолетовые спектры комет

Ультрафиолетовая спектроскопия уже давно является мощным средством наблюдений в планетных атмосферах их четырех основных составляющих, т. е. Н, С, N и О, а также некото-

рых простых молекул, образованных из этих элементов. При этом используются резонансные переходы в спектральной области вакуумного ультрафиолета. Интенсивная флуоресценция кометной атмосферы под действием солнечного ультрафиолета наблюдалась в ракетных экспериментах у кометы Веста [5, 21]. Были обнаружены некоторые компоненты, первоначально в кометах не наблюдавшиеся, а для содержания других была получена определенная верхняя граница. Список известных компонентов дан в табл. 1. Наблюдения комет Сарджента и Брэдфилда со спутника IUE не дополнили этот список, однако данные о пространственном распределении эмиссий молекулы

Таблица 1

## Компоненты комет, наблюдаемые в ультрафиолете

Наблюдаемые компоненты	Длины волн, Å	Наблюдаемые компоненты	Длины волн, Å	
HI	1216	OH	3085	
OI	1304	CO <sup>+</sup>	2200	
CI	1561, 1657	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2890	
CI ( <sup>1</sup> D)	1931	Верхние пределы		
SI	1814			
СИ	1335			
CO	1510		H <sub>2</sub>	1608
C <sub>2</sub>	2313		CO <sub>2</sub>	1993
CS	2576	NO	2150	

CS указали на то, что вероятной родительской молекулой является CS<sub>2</sub>. В то время как по эмиссиям H<sub>2</sub>O не удалось обнаружить этой молекулы, все три продукта ее диссоциации — H, OH и O были определены в ультрафиолетовой части спектра. В противоположность этому нейтральные компоненты, видимые в оптической части спектра (т. е. CN, NH, C<sub>2</sub> и C<sub>3</sub>), — это все высокоактивные радикалы, образованные из (пока еще не выявленных) исходных молекул, содержание которых в коме составляет менее 1% от содержания воды.

Неожиданным оказалось, что для всех трех комет, которые наблюдались в ультрафиолете, т. е. для комет Веста, Сарджента и Брэдфилда, отличавшихся между собой по виду, отношению газ/пыль, по скорости выделения газов, гелиоцентрическим расстояниям и геометрии их наблюдения, спектры имели между собой замечательное сходство. Это сходство говорит в пользу представлений об едином составе и, возможно, общем происхождении большей части комет. Далее, это сходство наводит на мысль о том, что химические реакции во внутренней части комы играют несущественную роль и не влияют на содержание

основных компонентов, которое должно определяться главным образом фотохимией исходных составляющих, испаряемых из ядра кометы. Данные о комете Брэдфилда указывают на то, что от химических реакций во внутренней коме зависит только образование метастабильных атомов С ( $^1D$ ) (нижний уровень перехода с  $\lambda = 1931 \text{ \AA}$ ), при этом наиболее вероятно, что здесь играет роль диссоциативная рекомбинация ионов  $\text{CO}^+$  [7].

На рис. 1 и 2 приведены образцы спектров комет Веста [5] и Брэдфилда [8] соответственно. В обоих случаях полный диапазон интересующих длин волн (1200—3200  $\text{\AA}$ ) требовал использования двух отдельных спектрографов, особенности которых

Таблица 2

Параметры измерений спектров, показанных на рис. 1 и 2

	Комета Веста (1976 VI)	Комета Брэдфилда (1979 X)
Дата	5 марта 1976 г.	10 января 1980 г.
Метод измерений	Ракетный	Со спутника
Гелиоцентрическое расстояние $r$ , а. е.	0,385	0,71
Геоцентрическое расстояние $\Delta$ , а. е.	0,84	0,615
Поле зрения прибора	$10' \times 35'$ (короткие волны) $5' \times 35'$ (длинные волны)	$10'' \times 20''$ (короткие и длинные волны)
Спектральное разрешение	15 $\text{\AA}$ (короткие волны) 22 $\text{\AA}$ (длинные волны)	11 $\text{\AA}$ (короткие волны) 18 $\text{\AA}$ (длинные волны)
Скорость образования $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{с}^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{30}$	$(1-2) \cdot 10^{29}$

здесь не будут обсуждаться. Однако некоторые важные различия необходимо отметить — они приведены в табл. 2. В спектрах обеих комет линия  $\text{HI } L\alpha$  (1216  $\text{\AA}$ ) и полоса  $\text{OH } (0,0)$  (около 3090  $\text{\AA}$ ) были значительно интенсивнее любых других деталей спектра — отчасти вследствие значительного содержания водорода и гидроксила, а отчасти из-за высоких значений « $g$ -факторов» резонансного рассеяния для этих переходов. Чтобы избежать искажения слабой картины спектра рассеянием  $L\alpha$  в аппаратуре, в ракетном эксперименте Фельдмана и Брюна на коротковолновом спектрометре был использован фильтр, изготовленный из фтористого кальция ( $\text{CaF}_2$ ) и снижавший интенсивность линии 1216  $\text{\AA}$  до 1 %. Между этими двумя кометами в отношении газ/пыль существует важное различие: комета Веста представляет собой комету с преимущественным содержанием пыли, в то время как комета Брэдфилда пыли почти совершенно лишена.

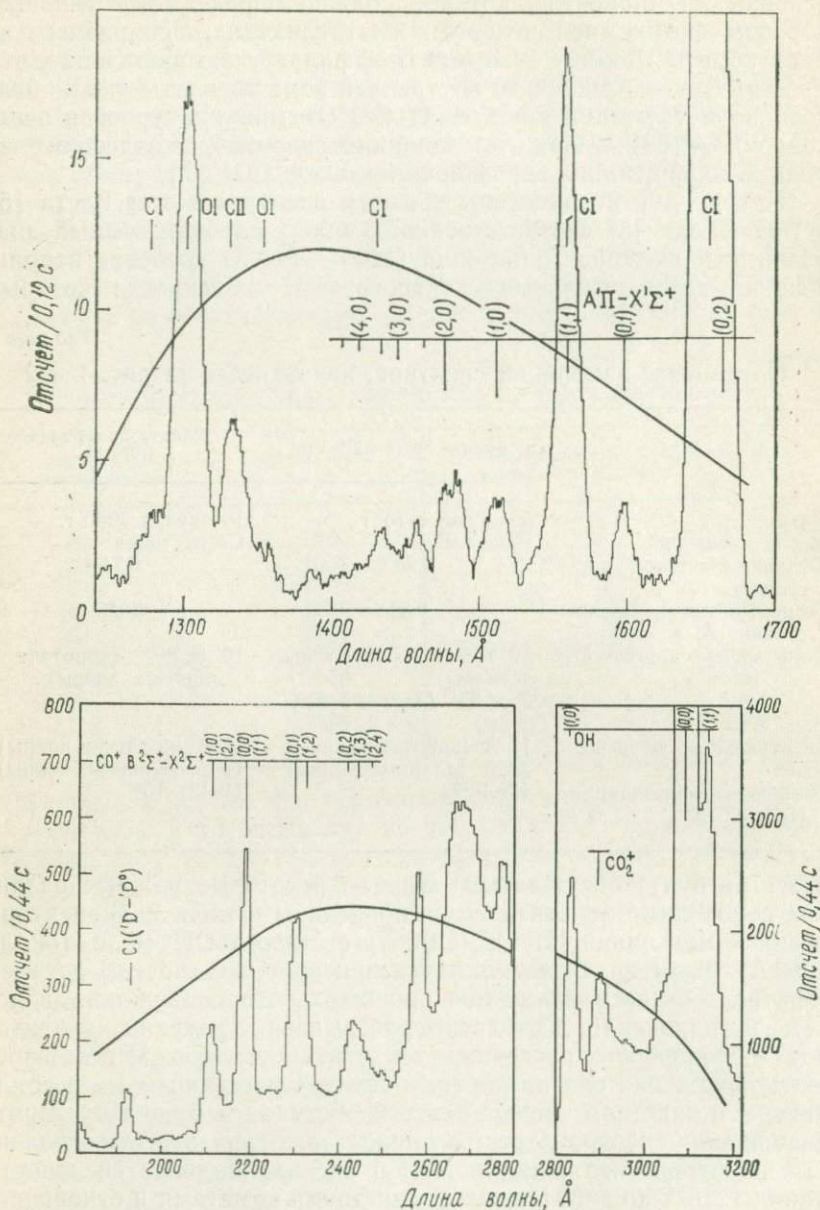


Рис. 1. Ультрафиолетовые спектры кометы Веста, полученные с помощью ракетной аппаратуры 5 марта 1976 г. Полоса ОН (0,0) 3090Å дала зашкаливание при интенсивности 55 тыс. отсчетов за 0,44 с. Сплошная линия — характеристика инструмента.

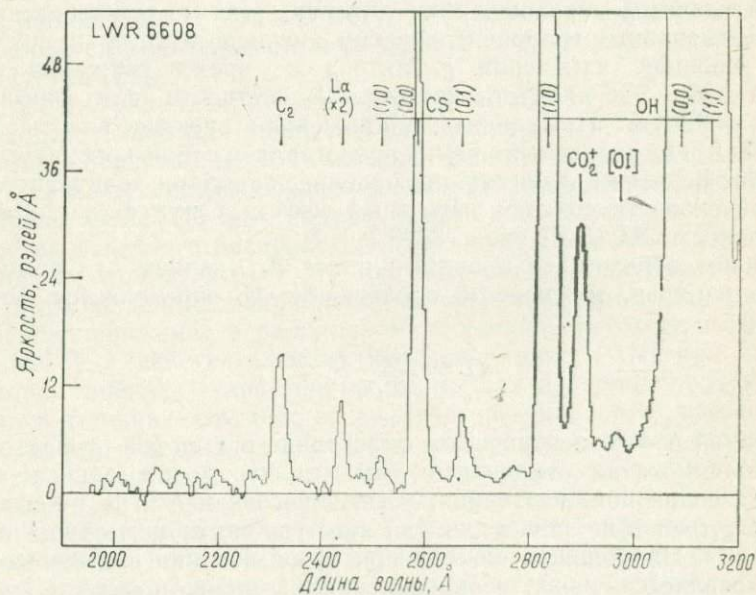
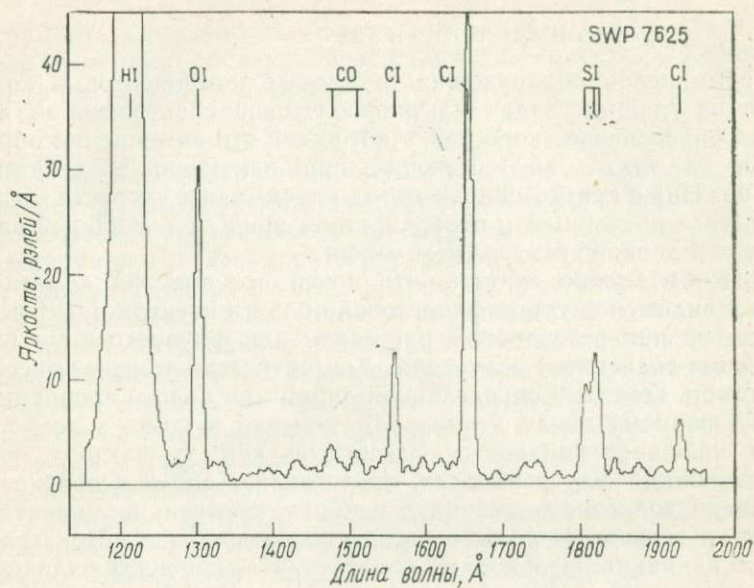


Рис. 2. Ультрафиолетовые спектры кометы Брэдфила, снятые со спутника IUE 10 января 1980 г.

## Скорость выделения газа

Кроме целей обнаружения отдельных компонентов в коме одной из главных задач ультрафиолетовой спектроскопии является определение скоростей, с которыми эти компоненты образуются, а также их изменений при изменении воздействия Солнца. Ниже кратко описан метод определения скорости выделения газа по данным о поверхностной яркости или общей светимости в данной спектральной линии.

В целом можно считать, что почти все эмиссии кометной комы в видимой и ультрафиолетовой области спектра будут возбуждаться при резонансном рассеянии или флуоресценции под действием солнечного излучения. Для оптически тонких эмиссий светимость кометы в определенной линии или полосе пропорциональна полному числу атомов или молекул в коме, а коэффициент пропорциональности, известный как « $g$ -фактор» или эффективность флуоресценции, представляет собой вероятность рассеяния солнечного фотона в единицу времени на молекулу.  $g$ -фактор зависит от силы осциллятора перехода и потока солнечной радиации. Необходимо отметить, что солнечная радиация в ультрафиолете с длиной волны короче  $\sim 1700 \text{ \AA}$  представляет собой главным образом линии эмиссии, так что доплеровский сдвиг, вызванный гелиоцентрическим движением кометы, может дать большие изменения  $g$ -фактора во время движения по орбите [6]. Это следует учитывать, в частности, для эмиссии ОI  $\lambda = 1304 \text{ \AA}$ . При любых длинах волны спектра вплоть до  $\sim 1700 \text{ \AA}$ , где солнечный спектр представляет собой континуум с фраунгоферовыми линиями поглощения, вариации гелиоцентрической скорости создают известный эффект Свингса, например для полосы ОН (0, 0) около  $3090 \text{ \AA}$  [17].

Таким образом, если полный поток  $F_i$  в линии  $i$ -го компонента измерен, то скорость образования  $Q_i$  определяется формулой

$$Q_i = \frac{4\pi\Delta^2 F_i}{g_i \tau_i},$$

в которой  $\Delta$  — геоцентрическое расстояние в а. е.,  $g_i$  —  $g$ -фактор,  $\tau_i$  — время жизни компонента. Заметим, что  $g_i$  и  $\tau_i$  зависят от потока солнечного излучения, убывающего как  $r^{-2}$ , но произведение  $g_i \tau_i$  от  $r$  не зависит, и для него удобно принять значение на 1 а. е. Наибольшая ошибка при использовании соотношения (1) появляется из-за неопределенности времени жизни компонента.

При многих наблюдениях комет и в особенности при измерении УФ-спектра, когда времена жизни компонентов соответствуют характерным размерам больше  $10^6 \text{ км}$ , в поле зрения

инструмента оказывается малая часть комы, и вместо полного потока измеряют среднюю поверхностную яркость. Обозначая ее  $B_i$  (в рэляях), будем иметь

$$B_i = \bar{N}_i g_i \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $\bar{N}_i$  — среднее содержание частиц компонента в столбе вдоль луча зрения. Эта величина определяется интегрированием в соответствующей модели величины  $N_i(\rho)$  вдоль луча зрения, где  $\rho$  — расстояние от точки интегрирования до ядра, с последующим интегрированием по полю зрения инструмента. Простейшая модель для плотности компонентов предполагает, что существует симметричное радиальное истечение вещества наружу и экспоненциальный распад [10, 11]; в ней вводится другой неизвестный параметр — скорость истечения компонента. Описание этой модели и учет в ней вторичного (дочернего) компонента были сделаны в работе [9]. Скорость истечения рассматривалась в [16] для исходных молекул, а в работах [9, 7] и др. — для различных атомарных дочерних продуктов. Вообще говоря, данных о пространственных вариациях яркости в зависимости от  $\rho$  достаточно только для определения характерных длин  $v_i t_i$ , но когда речь идет о продуктах диссоциации  $H_2O$ , то одновременные наблюдения H, OH и O могут дать однозначное определение и скоростей родительской молекулы, и времен жизни дочерних продуктов [22].

Модель радиального истечения имеет ряд ограничений. Она подходит только для продуктов фотораспада и не подходит для атомов, образованных в химических реакциях, например она не годится для углерода, образованного при диссоциативной рекомбинации  $CO^+$  [7]. Эта модель непригодна также для расчета пространственного распределения при очень больших скоростях дочерних атомов. Фестоу [9] построил модель диссоциации  $H_2O$  с учетом различных направлений истечения, которая показывает, что предположение о радиальном истечении дает хорошее приближение к действительному профилю яркости OH при заниженных оценках характерных длин для дочерних продуктов. Дополнительная трудность анализа резонансного рассеяния атомарного водорода и кислорода заключается в том, что в кометах с умеренной активностью содержание этих компонентов в столбе достаточно велико, так что ослабление потока излучения становится значительным. Однако полное решение задачи о переносе излучения затруднено из-за недостатка данных о действительных физических условиях в газовой коме. Кроме того, потоки солнечного ультрафиолета, определяющие резонансное рассеяние дочерними атомами и распад родительских молекул, могут меняться в 2—4 раза в течение солнечного цикла [20]. Несмотря на это, проведенный нами анализ эмиссий  $HI \text{ } \lambda\alpha$ ,

О1  $\lambda = 1302 \text{ \AA}$  и полосы ОН (0,0) показал, что наблюдаемая яркость вполне согласуется с предположением, что источником этих компонентов является молекула  $\text{H}_2\text{O}$ .

### Эволюция комы

Как отмечалось выше, наблюдения кометы Брэдфилда проводились в широком интервале гелиоцентрических расстояний, что позволило найти изменение во времени скорости выделения воды ядром кометы (а также в зависимости от расстояния до Солнца). Такой результат должен оказаться очень полезным для сравнения с предсказаниями различных моделей «грязного снеж-

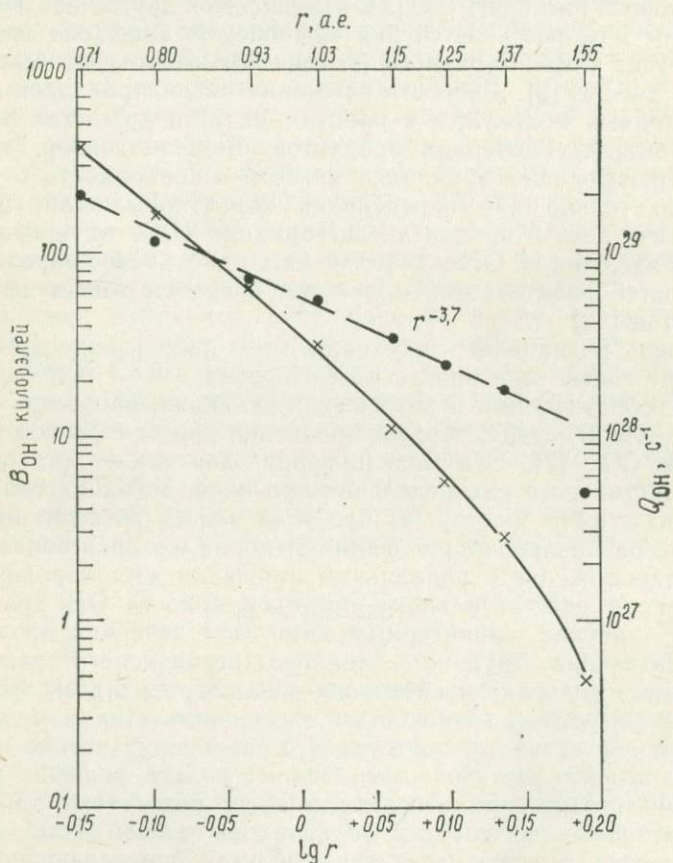


Рис. 3. Изменения яркости наблюдаемой полосы ОН(0,0) (крестики) в зависимости от гелиоцентрического расстояния и определенная отсюда скорость образования ОН (точки).

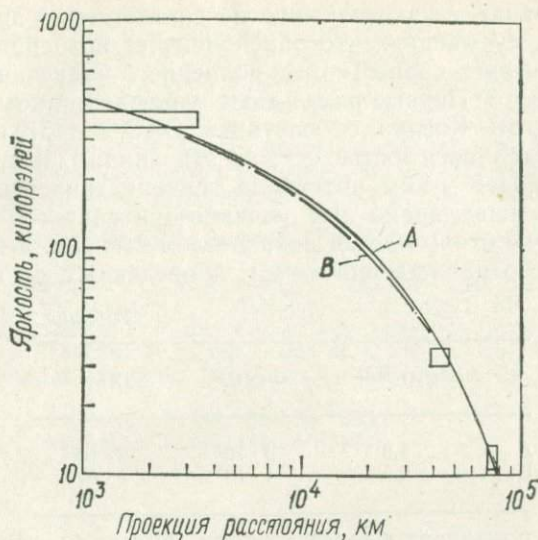


Рис. 4. Сравнение профиля яркости полосы  $\text{OH}(0,0)$  с результатами модели радиального истечения, параметры которой приведены в табл. 3. Прямоугольниками показаны данные для трех экспозиций: размер их по горизонтали соответствует проекции длины щели спектрографа на комету, размер по вертикали — ошибке измерения.

ного кома». На рис. 3 показаны значения яркости полосы  $\text{OH}(0,0)$   $\lambda = 3090 \text{ \AA}$ , усредненные по апертурному углу спектрографа  $10'' \times 15''$ . Там же приведены данные о скорости выделения  $\text{OH}$  ( $\sim 90\%$  от скорости выделения воды), определенной на основе данных модели радиального истечения, усредненных по апертуре прибора. В использованной модели (на рис. 3 она обозначена как модель A) скорость истечения молекул воды принята равной  $1,0 \text{ км/с}$ , а время жизни радикала  $\text{OH}$   $\tau_{\text{OH}} = 5 \cdot 10^4 \text{ с}$  на 1 а. е. Другие параметры были такими: время жизни молекул воды на 1 а. е.  $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 8,2 \cdot 10^4 \text{ с}$  и скорость истечения  $\text{OH}$   $v_{\text{OH}} = 1,15 \text{ км/с}$ . Как видно из рис. 4, выбором подходящего значения  $v_{\text{H}_2\text{O}}$  можно получить близкое к реальному пространственное распределение яркости  $\text{OH}$ , если соответствующим образом подобрать время жизни  $\text{OH}$ , в то время как при использовании другой модели (B) с параметрами  $v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5 \text{ км/с}$ ,  $\tau_{\text{OH}} = 10^5 \text{ с}$  скорость выделения воды получается в два раза меньше показанной на рис. 3. Действительные значения лежат, по-видимому, между этими двумя крайними случаями (табл. 3).

Неожиданный результат, отраженный на рис. 3, состоит в том, что скорость выделения воды зависит от гелиоцентриче-

ского расстояния  $r$  как  $r^{-3,7}$ . Это не соответствует широко распространенному мнению, что определяющее воздействие на выделение оказывает полный поток солнечного излучения, который меняется как  $r^{-2}$ . Первые результаты наблюдений комет Беннета и Таго — Сато — Косака со спутника ОАО-2 [15] в основном согласуются с зависимостью  $r^{-2}$ , но эти данные были получены на гораздо более узком интервале гелиоцентрических расстояний. В настоящее время нет удовлетворительного объяснения зависимости со столь малым показателем степени, а недостаточное количество наблюдений комет, проведенных до настоящего

Таблица 3

	$v_{H_2O}$ , км/с	$\tau_{OH}$ , с	$Q_{OH}$ , с $^{-1}$
A	1,0	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{29}$
B	0,5	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{29}$

времени, не позволяет сделать вывод, будет ли такая зависимость типичной для большинства комет или нет. На основании сравнения результатов этих наблюдений с результатами одно-временных наземных наблюдений можно заметить, что такое поведение является аномальным (М. Ф. А'Херн, частное сообщение). Поскольку спектроскопия излучения ком в ультрафиолете представляет собой новое мощное наблюдательное средство, дальнейшие исследования большего числа комет должны помочь решить эту проблему.

Эта работа финансировалась НАСА (субсидии NGR 21-001-001 и NSG 5193).

## Литература

1. Bertaux J. L., Blamont J. E. and Festou M. *Astron. and Astrophys.*, **25**, 415—430, 1973.
2. Carruthers G. R., Opal C. B., Page T. L., Meier R. R. and Prinz D. K. *Icarus*, **23**, 526—537, 1974.
3. Code A. D., Houck T. E. and Lillie C. F. In: *The Scientific Results from Orbiting Astronomical Observatory (OAO-2)*, ed. A. D. Code, NASA SP-310, 109—114, 1972.
4. Feldman P. D., Takacs P. Z., Fastie W. G. and Donn B. *Science*, **185**, 705—707, 1974.
5. Feldman P. D. and Brune W. H. *Astrophys. J. (Letters)*, **209**, L45—L48, 1976.
6. Feldman P. D., Opal C. B., Meier R. R., Nicolas K. R. In: *The Study of Comets*, ed. B. Donn et al., NASA SP-393, 773—795, 1976.
7. Feldman P. D. *Astron. Astrophys.*, **70**, 547—553, 1978.
8. Feldman P. D., Weaver H. A., Festou M. C., A'Hearn M. F., Jackson W. M., Donn B., Rahe J., Smith A. M. and Benvenuti P. *Nature*, **286**, 132—135, 1980.

9. *Festou M.* Thèse de doctorat d'état, Université Paris VI, 1978.
10. *Haser L.* Bull. Acad. Roy. Belgique, Classe des Sciences, **43**, 740—750, 1957.
11. *Haser L.* Cong. Coll. Univ. Liège, **37**, 233—241, 1966.
12. *Jackson W. M., Rahe J., Donn B., Smith A. M., Keller H. U., Benvenuti P., Delsemme A. H. and Owen T.* Astron. Astrophys. **73**, L7—L9, 1978.
13. *Jenkins E. B., Wingert D. W.* Astrophys. J. **174**, 697—704, 1972.
14. *Keller H. U., Lillie C. F.* Astron. Astrophys., **34**, 187—196, 1974.
15. *Keller H. U., Lillie C. F.* Astron. Astrophys., **62**, 143—147, 1978.
16. *Mendis D. A., Ip W.-H.* Astrophys. and Space Sci. **39**, 335—385, 1976.
17. *Mies F. H.* Astrophys. J. (Letters), **191**, L145—L148, 1974.
18. *Opal C. B., Carruthers G. R., Prinz D. K. and Meier R. R.* Science, **185**, 702—705, 1974.
19. *Opal C. B., Carruthers G. R.* Astrophys. J. **211**, 294—299, 1977.
20. *Oppenheimer M., Downey C. J.* Astrophys. J. (Letters), **241**, 123—127, 1980.
21. *Smith A. M., Stecher T. P. and Casswell L.* Astrophys. J., in press, 1981.
22. *Weaver H. A., Feldman P. D. and Festou M. C.* In: The Universe at Ultraviolet Wavelengths; The First Two Years of IUE. NASA CP-XXX, in press, 1980.
23. *Whipple F. L.* Astrophys. J., **111**, 375—394, 1950.
24. *Whipple F. L.* Astrophys. J., **113**, 464—479, 1951.

# Расчеты спектров кометных молекул из условий статистического равновесия

К. Свами<sup>1)</sup>

Для решения ряда вопросов, связанных с наблюдениями молекулы  $C_2$  в кометах, предлагается модель, которая позволяет дать удовлетворительную интерпретацию всех таких наблюдений, проведенных до настоящего времени.

Рассмотрены также результаты расчетов резонансной флуоресценции многих других молекул, наблюдаемых в ультрафиолетовой части спектра с ракет и спутников.

## Введение

В первой части этой работы речь будет идти о молекуле  $C_2$  в кометах — теме, которая привлекала пристальное внимание различных исследователей в два последние десятилетия. Хотя линия молекулы  $C_2$  в оптическом диапазоне очень сильна, ее исследованию пришлось уделять много внимания, так как оно породило ряд вопросов, долгое время не находивших удовлетворительного объяснения.

Во второй части работы будет дана интерпретация особенностей УФ-спектров других молекул в кометах на основе процесса резонансной флуоресценции.

## Вопросы интерпретации спектра молекулы $C_2$

На рис. 1 изображена диаграмма энергетических уровней молекулы  $C_2$ , где показаны многие синглетные и триплетные переходы. Основное триплетное состояние примерно на  $710\text{ см}^{-1}$  выше основного синглетного. Сильные линии молекулы  $C_2$ , наблюдаемые в кометах, представляют собой полосы Свана, которые появляются из триплетного состояния. Полосы Филлиппа, появляющиеся при переходе в синглетное состояние, очень слабы. На рис. 1 показаны также колебательные уровни состояний  $X'$  и  $A'$  переходов Баллика — Рамсея. Как это хорошо видно на рисунке, для колебательных квантовых чисел  $v > 4$  уровни состояния  $X'$  будут выше, чем уровни состояния  $A'$ .

<sup>1)</sup> Отделение прикладной математики и астрономии, Университетский колледж, Кардифф, Уэльс, Великобритания (стажировка по направлению Института фундаментальных исследований Тата, Бомбей, Индия).

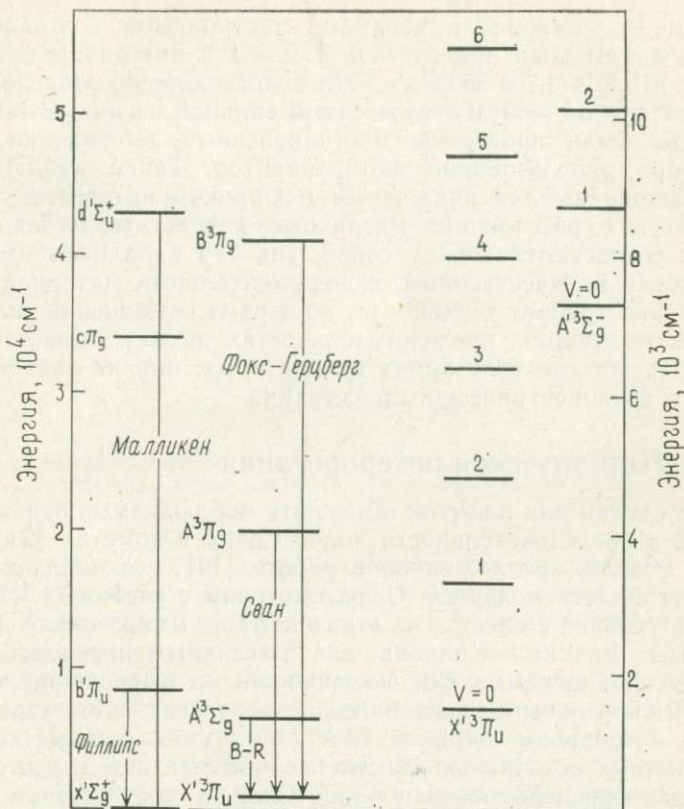


Рис. 1. Диаграмма урвней энергии молекулы  $C_2$ .

В такой ситуации могут иметь место переходы из этих урвней состояния  $X'$  в состояние  $A'$ . Указанные переходы приводят к важным последствиям, которые будут рассмотрены ниже. Неожиданная особенность, замеченная в наблюдениях молекул  $C_2$  в кометах, заключалась в следующем: во-первых, предполагаемые интенсивности полос Свана, основанные на механизме резонансной флуоресценции, не соответствовали наблюдаемым интенсивностям; во-вторых, линии, появляющиеся из триплетного состояния, оказались более сильными, чем линии из основного синглетного состояния. Прежде чем перейти к рассмотрению этих двух вопросов, дадим краткий обзор состояния наблюдений полос Свана.

Основная часть наблюдений, относящихся к молекуле  $C_2$ , касается интенсивностей последовательных полос. Они возникают при одном и том же изменении колебательного квантового

числа между нижним и верхним электронными состояниями. Для  $S_2$  длины волн при  $\Delta v = 0, 1$  и  $-1$  будут равны соответственно 516,5, 473,7 и 563,5 нм. Эти полосы хорошо разделяются, а полоса при  $\Delta v = 0$  является самой сильной из них. В последние годы были проведены многочисленные наблюдения этих полос при использовании фотоэлементов. Такие наблюдения были выполнены для ряда комет в широком интервале гелиоцентрических расстояний. Различные результаты наблюдений хорошо согласуются между собой, так что в наличии имеется однородный и качественный экспериментальный материал. Эти наблюдения говорят о том, что, во-первых, отношения потоков в соответствующих последовательностях полос, по-видимому, одни и те же для всех комет и, во-вторых, они не зависят заметно от гелиоцентрического расстояния.

### Теоретическая интерпретация

Был сделан ряд попыток объяснить наблюдаемые отношения потоков в последовательности полос Свана в кометах [21, 4, 5, 10]. В модели, предложенной в работе [14], все наблюдаемые полосы триплета молекулы  $S_2$  рассмотрены с учетом 14 колебательных уровней в каждом из этих электронных состояний. Коэффициенты Франка — Кондона для различных переходов рассчитаны по программе [3], построенной на вычислении потенциала RKR. Значения потоков солнечного излучения, усредненные по интервалам шириной 10 Å (1 нм), были заимствованы из различных источников. Изменение момента при электронных переходах определялось для полос Свана в соответствии с работой [22], для других полос — в соответствии с работами [6, 7]. Кроме обычных членов в уравнения статистического равновесия были включены два дополнительных члена, играющие важную роль. Они обозначаются  $A'$  и  $B'$  и появляются вследствие перемешивания колебательных уровней состояний  $X'$  и  $A'$ . Такое перемешивание создает возможность переходов при  $v > 4$  от  $X'$ -состояния к состоянию  $A'$ , а затем к более низким колебательным уровням состояния  $X'$ . Таким образом, состояние  $A'$  представляет как бы буферную зону для переходов подобного типа. Результирующий эффект таких переходов сводится к образованию заселенностей невольмановского типа с много большей концентрацией на низких колебательных уровнях, чем было бы без учета таких переходов [14].

Сравнение ожидаемых и действительных потоков в последовательных полосах Свана иллюстрирует рис. 2. Как показано на этом рисунке, совпадение является достаточно хорошим [14]. Небольшие расхождения, появляющиеся при больших гелиоцентрических расстояниях, возникают, по-видимому, в основ-

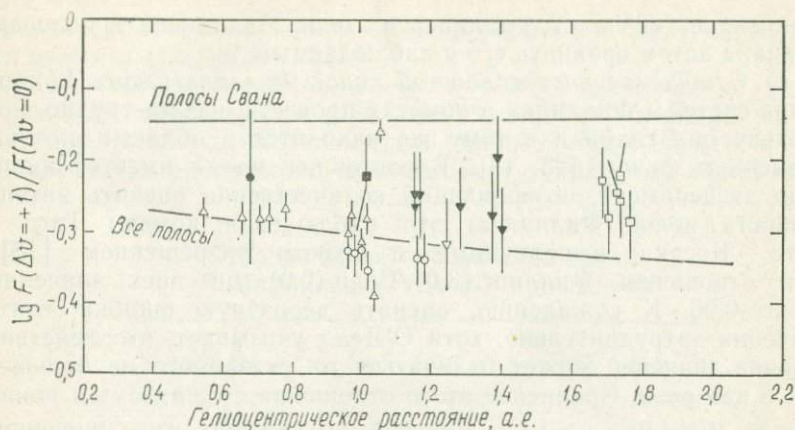


Рис. 2. Сравнение ожидаемых и измеренных отношений потоков в последовательности полос Свана —  $F(\Delta\nu = +1)/F(\Delta\nu = 0)$ .

ном из-за ошибок определения моментов для электронных переходов [1]. Таким образом, настоящая модель может удовлетворительно объяснять наблюдаемые отношения интенсивностей полос Свана в спектрах комет.

Перейдем теперь к рассмотрению других проблем, имеющих отношение к тому, что полосы Свана оказываются более интенсивными, нежели полосы Филлипса, в противоположность обычной картине. Эта проблема, также вызывающая значительный интерес, не находила долгое время сколько-нибудь приемлемого объяснения. Существует две возможности: 1) молекула  $C_2$  при своем формировании образуется преимущественно в триплетном состоянии; 2) в спектрах комет ослабляются линии синглетных серий. Чтобы выделить одну из этих возможностей, проведено полное моделирование спектров молекулы  $C_2$  [15, 16], в котором были рассмотрены следующие полосы: для синглетных серий — система Филлипса и Малликена, для триплетных — системы Баллика — Рамсея, Свана и Фокса — Герцберга. В расчет включены также взаимно-комбинационные переходы, которые определяют заселенность триплетных и синглетных уровней. Так как для этих переходов неизвестны силы осцилляторов, то в качестве свободного параметра оставлена величина  $|Re|_{ST}^2$ , представляющая собой момент электронного перехода для синглетно-триплетных переходов. Сравнение отношений потоков в последовательности полос Свана показывает, что  $|Re|_{ST}^2 \leq 10^{-5}$ . Считая, что скорость обмена между синглетными и триплетными состояниями почти не меняется, можно вычислить отношение

интенсивностей полос Филлипса и полос Малликена к полосам Свана, а затем сравнить его с наблюдаемым.

а) *Отношение интенсивностей полос Филлипс/Сван.* Наблюдение системы Филлипса в кометах провести весьма трудно, поскольку она слаба и к тому же находится в области спектра с высоким фоном [23, 18]. В настоящее время имеется лишь один эксперимент, позволяющий количественно оценить интенсивность полос Филлипса: это наблюдения кометы Таго—Сато—Косака, выполненные с низким разрешением [18]. Для отношения Филлипс (3,0)/Сван (0,0) он дает значение около 0,06. К сожалению, оценить вероятную ошибку этого значения затруднительно, хотя О'Делл указывает, что действительное значение может отличаться от указанного не больше, чем в два раза. Сравнение этого отношения с ожидаемым показывает, что  $|Re I_{ST}^2| \geq 10^{-5}$ . Ранее было указано, что отношение потоков в последовательных полосах Свана требует, чтобы  $|Re I_{ST}^2| \leq 10^{-5}$ . Таким образом,  $|Re I_{ST}^2| \approx 10^{-5}$  должно быть характерным значением параметра обмена для синглетно-триплетных переходов [18]. Следовательно, предсказанное отношение интенсивностей полос Филлипс/Сван, основанное на механизме резонансной флуоресценции, согласуется с имеющимися наблюдениями.

б) *Отношение интенсивностей полос Малликен/Сван.* Система Малликена при  $\Delta\nu = 0$  соответствует длине волны 231,3 нм. Однако эта слабая полоса в спектре блендируется сильными полосами  $CO^+$  вблизи 230,0 нм. Впервые указание на наличие полосы  $\Delta\nu = 0$  системы Малликена было сделано Смитом [17] в ракетном спектре кометы Веста. Эта полоса проявлялась хорошо, когда отсутствовали полосы  $CO^+$ . Именно так и получилось в спектрах комет Брэдфилда и Сарджента, снятых на спутнике IUE [2]. По наземным наблюдениям системы Свана с  $\Delta\nu = 0$  А'Херн и Фельдман получили следующую оценку:

$$\frac{F(\Delta\nu = 0, \text{ Малликен})}{F(\Delta\nu = 0, \text{ Сван})} = 3,5 \cdot 10^{-3}$$

при ошибке порядка 20%. Сравнение этого отношения с предсказанным (см. табл. 1; запись  $a(b)$  означает  $a \cdot 10^b$ ) [16, 2] приводит к следующей величине для скорости обмена:

$$|Re I_{ST}^2| \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-5}$$

Это значение хорошо соответствует предыдущим результатам, основанным на наблюдении полосы Филлипса. Полосы Малликена при  $\Delta\nu = +1$  и  $\Delta\nu = -1$  должны быть на два порядка величины слабее, чем полосы при  $\Delta\nu = 0$ , поэтому очень мало-

вероятно, чтобы их можно было наблюдать в спектрах, что мы и видим в действительности.

в) *Физические причины наблюдаемого соотношения интенсивностей синглетных и триплетных серий C<sub>2</sub>*. Последний вопрос, который необходимо рассмотреть, заключается в обратном соотношении интенсивностей синглетных и триплетных серий моле-

Таблица 1

Отношение интенсивностей полос  
F(Малликен)/F(Сван) при  $\Delta\nu = 0$

$ Re \int_{ST}^2$	$r_H = 0,5$ а. е.	$r_H = 1,0$ а. е.
$10^{-4}$	4,59 (-3)	5,07 (-3)
$10^{-5}$	3,13 (-3)	3,76 (-3)
$10^{-6}$	2,42 (-3)	2,46 (-3)
Наблюдения ( $r_H \approx 0,8$ а. е.)		3,5 (-3)

кулы C<sub>2</sub>. Чтобы выяснить физическую причину такого явления, мы рассчитали отношение полос Сван/Филлипс как функцию  $\Delta E$  — разности энергий между синглетными и триплетными состояниями. Результаты расчета для двух значений  $\Delta E$  показаны в табл. 2. Как видим, заселенность синглетных и триплетных уровней сильно зависит от  $\Delta E$ . Когда разность энергий увеличивается, интенсивность синглетных серий растет по сравнению с триплетными и в конце концов становится выше. Этот резуль-

Таблица 2

Изменение отношения интенсивностей  
в зависимости от  $\Delta E$

$\Delta E, \text{см}^{-1}$	714	2000
Сван (0,0)/Филлипс (0,0)	1,3 (1)	3,7 (-1)

тат можно уяснить, обратившись к отношению скоростей процессов поглощения ( $B\rho$ ) и излучения ( $A$ ). При разных  $\Delta E$  получаем

$$X \equiv |(B\rho/A) \Delta E_1 / (B\rho/A) \Delta E_2| = (\lambda_1/\lambda_2)^5 F_\odot(\lambda_1) / F_\odot(\lambda_2),$$

где  $\lambda$  и  $F_\odot$  обозначают длину волны и интенсивность солнечного излучения соответственно. Подставляя нужные значения, находим, что при изменении  $\Delta E$  от 714 до 2000  $\text{см}^{-1}$   $X = 3$ . Это

означает, что с увеличением  $\Delta E$  все больше молекул переходит из основного триплетного состояния в основное синглетное.

Таким образом, эту часть обсуждения можно заключить замечанием, что рассмотренная выше физическая модель может дать удовлетворительное объяснение всех вопросов, связанных со спектрами молекулы  $C_2$  в кометах.

### Другие молекулы, наблюдаемые в ультрафиолетовом спектре комет

Анализ кометных спектров в ультрафиолетовой области оказался возможным благодаря использованию ракет и спутников. Наилучшие спектры, имеющиеся на сегодняшний день, — это спектры кометы Веста, полученные Смитом [17, 20, 8]. В них обнаружено много новых переходов, и это позволило провести отождествление вновь открытых молекул. В последние годы наблюдения комет Сарджента и Брэдфилда, выполненные на спутнике IUE [9, 11], подтвердили многие результаты, полученные по спектрам Смита.

Был выполнен анализ спектров резонансной флуоресценции некоторых из таких молекул и проведено сравнение с имеющимися наблюдениями. Для гетероциклических молекул учитывались колебательные переходы в основное состояние молекулы. Анализ был проведен по методу, описанному в работе [19].

1.  $CO, CO^+$ . В предыдущей работе [13] в решении уравнений статистического равновесия были рассмотрены только синглетные серии молекулы  $CO$ . Недавно проведено полное моделирование молекулы  $CO$  с учетом следующих полос: синглетных серий — переходов ( $A-X$ ), ( $B-X$ ) и ( $B-A$ ), триплетных серий — групп Асунди, триплетной и третьей положительной группы. Для переходов синглет — триплет рассматривались полосы Камерона и Хопфилда — Бэрджа. Результаты этих расчетов оказались сходными с результатами предыдущей работы. Соответствие между предсказанными и действительными интенсивностями ( $A-X$ )-переходов было достаточно хорошим. Сильной оказалась и полоса (0, 0) системы ( $B-X$ ), которая должна просматриваться в будущих наблюдениях вблизи  $\lambda \approx 115$  нм. Из других переходов могут оказаться заметными только полосы Ангстрема при  $\nu' = 0$ .

2.  $CN, CN^+, CS$ . Удовлетворительным является и согласие ожидаемых результатов с наблюдениями для молекулы  $CN$  [14]. Однако пока нет достаточных данных об изменении момента в электронном переходе для этой молекулы. Требуется точные

значения этих величин, равно как и лучшие данные наблюдений, чтобы и для этой молекулы можно было говорить о хорошем соответствии.

Смитом было проведено отождествление полосы  $(0, 0)$  ( $f - a$ )-перехода и полос  $(0, 0)$ ,  $(0, 1)$  ( $c - a$ )-перехода молекулы  $CN^+$  в спектрах кометы Веста. Так как силы осцилляторов для этих переходов неизвестны, то вычисления были проведены так, чтобы оставались свободные параметры. Чтобы получить приемлемое соответствие с наблюдаемыми величинами отношений интенсивностей, необходимо было взять  $Re^2(c - a) = 1$  и  $Re^2(f - a) = 0,005$ . В будущем будут проведены лабораторные измерения некоторых таких величин.

3. **ОН.** Здесь также имеется вполне удовлетворительное совпадение, как это показано в табл. 3.

Таблица 3

Результаты модельных расчетов  
для молекулы ОН

Полоса	Расчет	Наблюдения *)
(0,0)	1,0	1,0
(1,0)	0,05	0,02
(1,1)	0,07	0,03

\*) Комета Брэдфилда [9].

### Выводы

В рамках предложенной нами модели были обсуждены некоторые проблемы, связанные с наблюдениями молекулы  $C_2$  в кометах. Показано, что с помощью этой модели естественным образом интерпретируются наблюдаемые интенсивности различных полос молекулы  $C_2$  в спектрах комет. Процесс резонансной флуоресценции для молекул, линии которых лежат в той же области, находится в соответствии с тем же механизмом. Таким образом, в итоге можно сказать, что процесс резонансной флуоресценции, по-видимому, вполне объясняет все основные особенности молекулярных спектров в оптическом и ультрафиолетовом диапазоне.

Я благодарен д-ру Ч. Р. О'Деллу за полезные обсуждения, которым он уделил внимание, несмотря на полную занятость

работой над проектом космического телескопа. Я хочу также поблагодарить Совет научных исследований Великобритании за поддержку при стажировке.

## Литература

1. A'Hearn M. F. *Ap. J.*, **219**, 768, 1978.
2. A'Hearn M. F., Feldman P. D. (in press), 1980.
3. Albritton D. L. (частное сообщение), 1977.
4. Arpigny C. *Ann. Rev. Astr. Ap.*, **3**, 351, 1965.
5. Arpigny C. *Ap. J.* **144**, 424, 1966.
6. Cooper D. M., Nicholls R. W. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf.*, **15**, 139, 1975.
7. Cooper D. M., Nicholls R. W. *Spectroscop. Letters*, **9**, 139, 1976.
8. Feldman P. D., Brune W. H. *Ap. J. (Letters)*, **209**, L45, 1976.
9. Feldman P. D., Weaver H. A., Festou M. C., A'Hearn M. F., Jackson W. M., Donn B., Rahe J., Smith A. M. and Benvenuti P. *Nature*, **286**, 132, 1980.
10. Gebel W. L. *Ap. J.*, **161**, 765, 1970.
11. Jackson M. W., Rahe J., Donn B., Smith A. M., Keller H. U., Benvenuti P., Delsemme A. M. and Owen T. *Astron. Astrophys.*, **73**, L9, 1979.
12. Krishna Swamy K. S. *Ap. J.*, **227**, 1082, 1979.
13. Krishna Swamy K. S. *Astron. Astrophys.* (in press), 1981.
14. Krishna Swamy K. S., O'Dell C. R. *Ap. J.* **216**, 158 (Paper I), 1977.
15. Krishna Swamy K. S., O'Dell C. R. *Ap. J.* **231**, 624 (Paper II), 1979.
16. Krishna Swamy K. S., O'Dell C. R. (in preparation), 1981.
17. Lillie C. F. *Proceedings of Shuttle-Based Cometary Science Workshop*, ed. G. A. Gary and K. S. Clifton, 205, 1976.
18. O'Dell C. R. *Ap. J.*, **164**, 511, 1971.
19. Penner S. S. *Quantitative Molecular Spectroscopy and Gas Emissivities*, (Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company), 1959. (Имеется перевод: С. С. Пеннер. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. — М.: ИЛ, 1963, 492 с.)
20. Smith A. M., Stecher T. P., and Casswell L. (in press), 1980.
21. Stockhausen R. E., Osterbrock D. E. *Ap. J.* **141**, 287, 1965.
22. Tatarczyk T., Fink E. H. and Becker K. H. *Chem. Phys. Letters.* **40**, 126, 1976.
23. Wyller A. A. *Observatory*, **82**, 73, 1962.

# Относительное содержание химических веществ в кометах

М. Ф. А'Херн<sup>1)</sup>

Методами фотометрии и спектрофотометрии с использованием фотоэлементов и фильтров удается определить абсолютное содержание ряда веществ в кометах. Несмотря на большие различия в морфологии, в отношении количеств газа и пыли и в динамическом возрасте комет, величины скоростей образования различных компонентов, исследованные достаточно полно, оказались удивительно близкими в различных кометах. Все же во многих кометах не было проведено измерений ряда компонентов, и, поскольку мы имеем дело с дочерними составляющими, можно, вообще говоря, предположить, что скорости образования определяют реакции в коме. Однако более вероятным кажется утверждение, что найденные скорости образования определяются прежде всего составом ядра, а это означает тогда, что ядра комет однородны по глубине, а все кометы, вероятно, были сформированы в однородной области досолнечной туманности.

Различия спектров разных комет, а также изменения спектров при изменении гелиоцентрических расстояний обсуждались в докладе Донна на настоящем симпозиуме. Было указано на трудность выделения собственных изменений в спектрах, связанную с неоднородностью экспериментального материала, имеющегося на руках у исследователей. Я хотел бы рассмотреть некоторые результаты реализации программы получения однородных количественных данных о составе комет.

Нами в сотрудничестве с другими исследователями — в первую очередь следует назвать Р. Л. Миллса из обсерватории Ловелла — была разработана программа фотометрического и спектрофотометрического изучения комет с использованием фильтров и фотоэлементов. При использовании такой аппаратуры количество получаемых данных оказывается значительно меньшим, чем можно было бы получить фотографических спектров с малым разрешением. Таким образом исследуется меньше химических компонентов и в меньшем количестве комет. Меньшее число изученных комет обусловлено тем обстоятельством, что слабые кометы, спектры которых получить еще можно, могут не подходить для спектрофотометрирования. Но главное,

<sup>1)</sup> Программа астрономических исследований Мэрилендского университета, США.

конечно, в том, что фотографии спектров начали получать задолго до того, как стали проводить систематические фотометрические измерения: последние проводятся в течение впятеро более короткого периода. Меньшее же число изученных химических компонентов обусловлено тем обстоятельством, что при фотометрировании нельзя добиться такого же спектрального разрешения, как и при простом фотографировании спектров (если не отказаться от исследований большей части спектрального диапазона, данные о котором имеются у наблюдателей). Несмотря на такие ограничения, предложенная программа кажется очень важной, поскольку она дает возможность получить достаточное количество данных об абсолютном содержании различных компонентов. Другие ограничения являются общими и для спектроскопических и для фотометрических измерений. Измерения ограничиваются в основном летучими веществами. Пока комета не подойдет очень близко к Солнцу, других компонентов и не наблюдается. Весь мой доклад касается только летучих компонентов. Устойчивую к нагреванию часть кометного вещества рассматривает в своем докладе Браунли.

Для определения абсолютного интегрального содержания в столбе некоторого компонента измеряется абсолютная величина потока в какой-то линии или полосе излучения интересующего нас компонента. Далее проводится расчет флуоресценции так, как это было описано в докладе Кришна Свами (в спектрах комет есть лишь несколько полос и линий, не связанных с флуоресценцией). В результате мы получаем абсолютное содержание компонента в столбе, проинтегрированное по некоторому объему кометы, находящемуся в поле зрения инструмента. Эти непосредственным образом определенные содержания компонентов в столбе служат далее для сравнения с химическими моделями. Такие модели будут рассмотрены в докладе Хюбнера. Однако сравнивать кометы друг с другом по измеренным содержаниям компонентов затруднительно.

Из-за различия геометрических конфигураций обычно в поле наблюдения оказываются разные объемы в различных кометах. Они зависят также от момента наблюдения. Кроме того, известно, что различные химические компоненты неодинаково распределены в кометах. Наконец, многие компоненты имеют малое (порядка дней и меньше) время жизни. Поэтому мы будем характеризовать содержание химических веществ в кометах величиной скорости образования того или иного компонента. Чтобы оценить эти величины, заметим, что пространственное распределение большинства компонентов можно описать моделью Хейзера с соответствующим образом подобранными числовыми параметрами, которые известны для главных компонентов. Безотносительно к физической основе модели Хейзера отметим, что

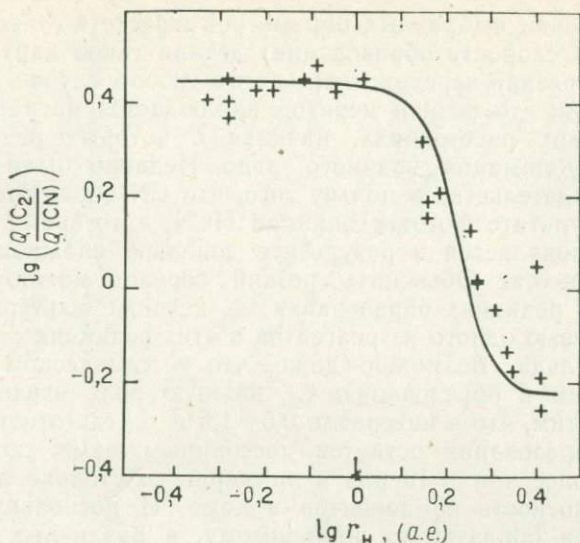


Рис. 1. Отношение скоростей образования молекул  $C_2$  и CN, измеренных в комете Веста (1975п), в зависимости от гелиоцентрического расстояния. Сплошная линия показывает величину, предсказываемую моделью, в которой родительские молекулы для  $C_2$  содержатся в ледяных зернах, а для CN — в более летучих компонентах.

она позволяет получить по данным о содержании того или иного компонента в столбе для определенной части кометы общее его содержание, проинтегрированное по всему объему кометы. Разделив его затем на время жизни компонента, получим скорость образования.

Сначала мы рассмотрим компоненты  $C_2$  и CN. Они не являются наиболее важными компонентами комет, но обычно их наблюдение довольно просто осуществить<sup>1)</sup>. По фотоснимкам спектров комет — это мы видели по спектрам кометы Кэннингхэма, показанным на нашем коллоквиуме Донном, — давно известно, что молекула CN наблюдается при больших гелиоцентрических расстояниях, чем молекула  $C_2$ . Рис. 1 иллюстрирует это количественно: на нем в логарифмическом масштабе показана зависимость отношения скоростей образования  $C_2$  и CN от гелиоцентрического расстояния для кометы Веста. При малых гелиоцентрических расстояниях это отношение почти постоянно, а затем резко меняется в интервале от 1,5 а. е. до 2,0 а. е. Хотя

<sup>1)</sup> Свечение молекул CN и  $C_2$  (а также  $C_3$  — полоса 4050 Å) почти полностью определяет яркость головы кометы, а при отсутствии газовых хвостов — и яркость кометы вообще, делая возможными и абсолютные фотометрические измерения. — Прим. ред.

при изменении выбранных параметров пересчета (от содержаний в столбе к скорости образования) детали такой картины могут меняться, резкий переход отмечается в любом случае.

Заметим, что резкий переход наблюдается на таких гелиоцентрических расстояниях, начиная с которых резко уменьшается сублимация водяного льда. Недавно были получены веские свидетельства в пользу того, что CN образуется в кометах в результате фотодиссоциации HCN, в то время как молекула  $C_2$  появляется в результате довольно сложного химического процесса. Объяснить резкий переход можно и резким порогом в реакциях образования  $C_2$ , а также альтернативно — тесной связью одного из реагентов в этих реакциях с частицами водяного льда. Возможно даже, что в химическом процессе, приводящем к образованию  $C_2$ , важную роль играет водяной пар. Отметим, что в интервале 0,5—1,5 а. е., где отношение скоростей образования остается постоянным, сами скорости меняются более чем в 10 раз и примерно во столько же раз меняется плотность компонентов в коме. И поскольку эти два компонента образуются, по-видимому, в различных реакциях, их содержание должно в большей степени определяться составом ядра, а не скоростями реакций.

На рис. 2 это отношение показано для многих комет. Как видно из сказанного выше, целесообразно разделить все кометы на две группы — на наблюдаемые вблизи Солнца ( $\leq 1,5$  а. е.) и вдали от него ( $\geq 2$  а. е.). Чтобы свести все данные о скоростях образования к одному гелиоцентрическому расстоянию (1 а. е.), примем, что их величины меняются как  $r^{-2}$ . На рис. 2 по осям отложены такие приведенные величины скоростей образования молекул  $C_2$  и CN. В большинстве случаев проводилось усреднение всех наблюдений для каждой кометы, но в тех случаях, когда наблюдались явные отклонения от зависимости  $r^{-2}$ , данные для различных участков орбиты наносились отдельно; пары таких точек соединены на рис. 2 пунктирными линиями. Как видим, данные почти по всем кометам, находящимся близко от Солнца, ложатся на одну прямую, что соответствует постоянному отношению скоростей образования. Среднеквадратическое отклонение составляет менее 0,1 в логарифмическом масштабе, т. е. менее 25% по величине относительного содержания при изменении скорости образования на 4 порядка величины. Данные для удаленных комет, включая почти короткопериодическую комету Григга — Скеллерупа, ложатся вдоль параллельной линии, которая свидетельствует также о постоянном, но более высоком отношении CN/ $C_2$ . Явной корреляции указанных на графике величин с отношением газ/пыль не наблюдается, хотя отношение излучений континуум/эмиссии меняется на несколько порядков величины. Хотя этого не видно по рисунку, исследо-

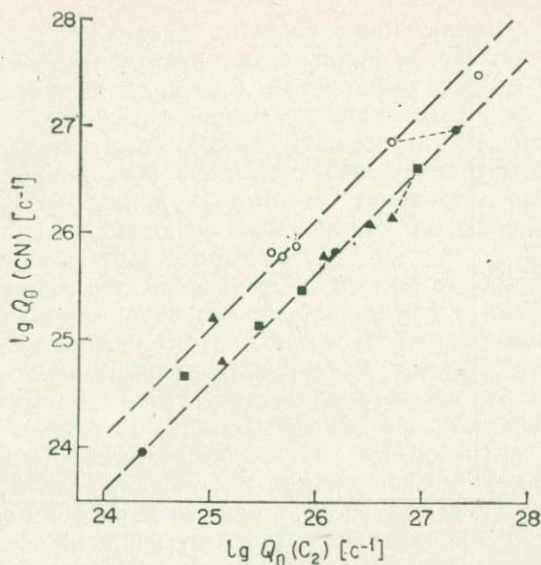


Рис. 2. Сравнение скоростей образования CN и  $C_2$ , приведенных к гелиоцентрическому расстоянию 1 а. е. Зачерненные значки относятся к кометам, наблюдаемым на гелиоцентрических расстояниях, меньших 1,5 а. е., светлые — к кометам на расстояниях больше 2,0 а. е. (треугольники — газовые кометы; квадратики — кометы со смешанным содержанием; кружки — пылевые кометы).

ванные кометы имели самый различный динамический возраст — от сильно проэволюционировавшей кометы Энке до некоторых новых комет, которые, по-видимому, совершали первый проход через Солнечную систему [ $1/a_0 < 10^{-4}$  (а. е.) $^{-1}$ ].

Из сказанного напрашивается вывод, что, по крайней мере, в отношении родительских молекул этих двух компонентов ядра комет должны быть очень однородны; комета Григга — Скьеллерупа все же составляет исключение. (Некоторые результаты говорят о том, что еще одна или две кометы могут составить исключение.) Отсутствие каких-либо вариаций с динамическим возрастом подразумевает однородность ядер по глубине и, следовательно, отсутствие какого-либо процесса дифференциации в ядре как при аккреции, так и при последующих разогревах. Отсюда следует вывод о том, что все кометы, исключая комету Григга — Скьеллерупа, могли быть образованы из однородной части досолнечной туманности. Наконец, отсутствие каких-либо вариаций, несмотря на изменения скорости образования в широких пределах (что свидетельствует о значительных изменениях плотностей в коме), по-видимому, означает, что конечная скорость образования не определяется скоростями реакций, которые

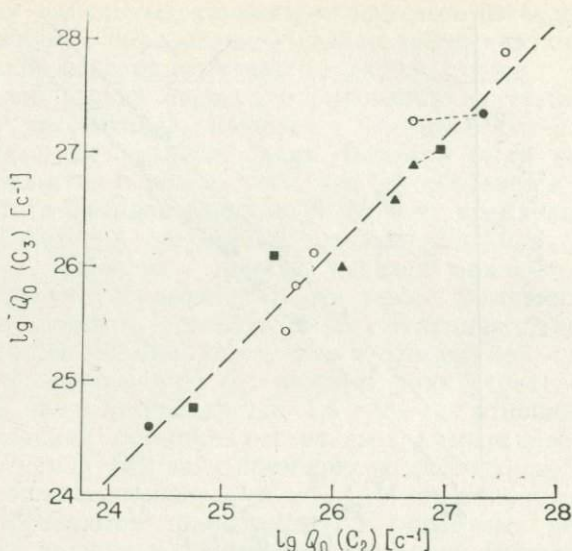


Рис. 3. Сравнение скоростей образования  $C_3$  и  $C_2$ , приведенных к гелиоцентрическому расстоянию 1 а. е., по недавним наблюдениям ряда комет. Обозначения те же, что и на рис. 2.

зависят от плотностей. Это относится к ряду составляющих в химических моделях комы, о чем будет говорить Хьюбер.

Все сказанное, однако, касается двух компонентов, для которых легко провести измерения, но роль которых в химических процессах невелика. На рис. 3 показаны аналогичные результаты, полученные для молекулы  $C_3$ . Ее спектр, как и спектр молекулы  $CN$ , можно получить при больших гелиоцентрических расстояниях. Из этого рисунка видно, что отношение  $C_3/C_2$  от гелиоцентрического расстояния не зависит. Для молекулы  $C_3$  ошибка измерений больше, чем для  $CN$  и  $C_2$ , поскольку ее эмиссионная полоса слабее и шире. Кроме того, ион  $CO^+$ , который, как известно, хорошо регистрируется в некоторых кометах, имеет эмиссионную полосу, накладывающуюся на полосу  $C_3$ , и отделить эту помеху нельзя. По-видимому, это приводит к значительному разбросу экспериментальных точек, маскирующему действительное изменение отношения  $C_3/C_2$  с изменением гелиоцентрического расстояния, но вполне возможно, что наблюдаемые изменения в спектрах объясняются просто увеличением контрастности, связанным с существенно более высокой концентрацией  $C_3$  вблизи ядра. Во всяком случае, этот вопрос требует дополнительной проработки, и в настоящее время мы не можем говорить о каком-либо значительном рассеянии величин отно-

сительного содержания  $C_3$ , обусловленном каким-либо процессом в космосе. Относительно же величин абсолютного содержания  $C_3$ , показанных на рис. 3, необходимо сделать следующее замечание. Ни для каких переходов молекулы  $C_3$  не была измерена сила осциллятора. Расчет содержания  $C_3$  основывается только на оценках этой величины. Таким образом, полученное абсолютное содержание  $C_3$  может заключать значительную ошибку, которая, однако, не будет влиять на результат сравнения данных для разных комет.

К сожалению, рассмотренные молекулы относятся, по-видимому, к малым компонентам, содержащимся в количестве следов. Здесь этот термин употребляется не в том смысле, в каком он используется в химической практике; там, как известно, под следами понимают присутствие нескольких частиц на миллион. Здесь же речь идет об одном проценте или несколько меньшей части от общего количества летучих компонентов комет. Как же обстоит дело с основными компонентами? Если проводить аналогию с наблюдениями планет, то в их число надо включить воду, метан, аммиак, окись и двуокись углерода. К сожалению, обычно эти компоненты не наблюдаются в кометах непосредственно, хотя сообщалось об обнаружении  $H_2O$  по излучению в радиодиапазоне и  $CO$  — по излучению в ультрафиолете по крайней мере в двух кометах. Прежде чем перейти к этим компонентам, я хотел бы остановиться на двух других, наблюдаемых в количестве следов, но связанных с широко распространенными компонентами. Речь идет о радикалах  $NH_2$  (амине) и  $CH$ .

$NH_2$  и  $CH$  имеют довольно слабые оптические эмиссии, так что наблюдать их можно только с помощью спектрофотометров. Простое же фотометрирование с помощью светофильтров не удается. Этим объясняется тот факт, что их содержание известно только в некоторых кометах, но и в этих кометах оно составляет лишь несколько процентов от содержания  $C_2$ . Следовательно, эти компоненты также должны содержаться в количестве следов, если только времена их жизни не окажутся на порядки величин меньше времени жизни  $C_2$ . А так как амин получается при фотодиссоциации какой-то заметной части аммиака, то отсюда следует вывод, что и аммиак не является основным компонентом кометных ядер. И если уже относительно самого радикала амина трудно сказать что-либо, касающееся его изменений от кометы к комете, то еще труднее сказать это об аммиаке, который является лишь одним из возможных исходных соединений. Трудно сказать что-либо и относительно радикала  $CH$ , для которого родительские соединения точно не известны. Для метана требуется многократная диссоциация, чтобы появился радикал  $CH$ . Однако вывод о низком

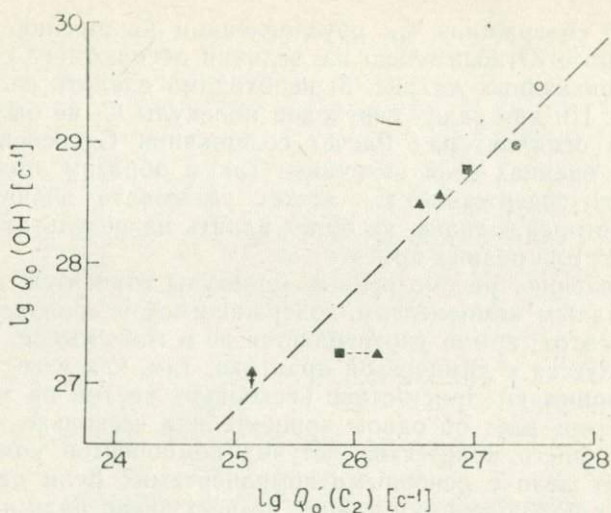


Рис. 4. Сравнение скоростей образования  $\text{OH}$  и  $\text{C}_2$ , приведенных к гелиоцентрическому расстоянию 1 а. е., по недавним наблюдениям ряда комет. Обозначения те же, что и на рис. 2.

содержанию метана был также сделан в результате неудачных поисков в инфракрасной и ультрафиолетовой части спектра молекулы  $\text{H}_2$  — одного из ожидаемых продуктов диссоциации.

Отбросив два возможных компонента —  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$ , рассмотрим единственный хорошо известный компонент —  $\text{H}_2\text{O}$ . В докладе Фельдмана были представлены веские доказательства того, что компоненты  $\text{O}$ ,  $\text{H}$  и  $\text{OH}$  образуются главным образом в результате диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$ . Таким образом, скорость образования  $\text{OH}$  может дать прямые сведения о скорости выделения  $\text{H}_2\text{O}$ . Удачно, что радикал  $\text{OH}$  можно достаточно четко регистрировать с помощью соответствующей аппаратуры: у границы атмосферного обрезания ( $\lambda$  3035 Å) имеется очень сильный электронный переход, поэтому  $\text{OH}$  в кометах может наблюдаться даже с Земли, хотя наилучшим образом он регистрируется с космических аппаратов. Кроме того,  $\Lambda$ -двойной переход можно наблюдать в радиодиапазоне.

Рис. 4 показывает значения скоростей образования  $\text{OH}$  и  $\text{C}_2$ . Данные по  $\text{OH}$  приведены по результатам работы [3], в которой сообщалось о наблюдениях значительного числа комет с помощью одинаковой аппаратуры. Обнаруживается систематическое расхождение скоростей образования, рассчитанных по электронным переходам и вычисленных по  $\Lambda$ -двойным переходам, так что даже однородных данных о полосах в ультрафиолете оказывается недостаточно для расчета этих величин. Данные

спектральных наблюдений комет Брэдфилда и Энке в ультрафиолетовой области спектра, рассмотренные ранее Фельдманом, указывают на то, что скорость образования молекулы  $C_2$  составляет не несколько процентов от скорости образования  $OH$ , как следует из рис. 4, а всего лишь 1%. Результаты измерений в радиодиапазоне должны быть достаточно однородными, чтобы можно было оценить изменения состава. Опять-таки, хотя на рис. 4 не показано больших изменений состава, многие данные говорят о том, что необходимо лучше изучить этот вопрос.

Если рассматривать кометы с очень разными величинами отношений газ/пыль или кометы, сильно различающиеся по своему строению, то оказывается, что в химическом их составе может быть мало различий. Еще два основных компонента, которые мы не рассмотрели, — это  $CO$  и  $CO_2$ . Как сообщил ранее Фельдман, из наблюдений кометы Веста видно, что скорости образования  $CO$  и  $CO_2$  составляют примерно 20% от скорости образования  $H_2O$ . В работе [2] из наблюдений запрещенных линий кислорода в комете Беннета сделан вывод, что скорость образования  $CO_2$  составляет 50% от скорости образования  $H_2O$ . Обе эти кометы являются настоящими пылевыми кометами. По наблюдениям кометы Веста было замечено, что скорость образования молекулы  $CN$  меняется по закону  $r^{-2}$  [1] вплоть до очень больших гелиоцентрических расстояний; это свидетельствует, что выводы о постоянстве состава относятся и к содержанию более летучих компонентов, нежели вода. «Незвездный» вид многих пылевых комет на больших гелиоцентрических расстояниях свидетельствует об обилии летучих компонентов. С другой стороны, расчет негравитационных сил из реальных орбит многих комет свидетельствует о том, что основным выделяемым веществом в этих кометах является  $H_2O$ .

Возможный ход процессов в известной модели Уиппла заключается в подъеме ледяных зерен от ядра при испарении более летучих компонентов, таких, как  $CO$  или  $CO_2$  [1]. Возможно, различие относительных содержаний летучих компонентов и определяет, является ли соответствующая комета газовой или пылевой. Как видим, надо изучить и такую возможность; это можно сделать по наблюдениям  $C$ ,  $CO$ ,  $CO^+$  и  $CO_2^+$  в ультрафиолетовой области спектра, если принять, что различий в химическом составе нет. Что касается содержания других компонентов, то кометы показывают замечательное сходство друг с другом; это наводит на мысль об однородности ядер по глубине, а значит, и однородности среды, в которой образовались кометы.

Большая часть этой работы была проведена благодаря субсидии НАСА NSG 7322.

## Литература

1. *A'Hearn M. F., Cowan J. J. Moon & Planets*, 23, 41, 1980.
2. *Delsemme A. H., Combi M. R. Ap. J.*, 228, 330, 1979.
3. *Despois K., Gerard E., Crovisier J. and Kazes I. Trans. IAU*, 17, (in press), 1980.

Значительная часть этих работ проведена при поддержке НАСА — субсидия NSG-7322.

Подробности многих представленных здесь экспериментальных результатов можно найти в следующих работах:

4. *A'Hearn M. F. A. J.*, 80, 861, 1975.
5. *A'Hearn M. F., Cowan J. J. A. J.*, 80, 852, 1975.
6. *A'Hearn M. F., Thurber C. H., Millis R. L. A. J.*, 82, 518, 1977.
7. *A'Hearn M. F., Hanisch R. J., Thurber C. H. A. J.*, 85, 74, 1980.
8. *A'Hearn M. F., Millis R. L., Birch P. V. A. J.*, 84, 570, 1979.
9. *A'Hearn M. F., Millis R. L. A. J.*, 85, 1528, 1980.

# Межпланетная пыль — ее физическая природа и вход в атмосферы планет земной группы

Д. Е. Браунли <sup>1)</sup>

Исследования взвешенных частиц, собранных в стратосфере и на дне морей, указывают на то, что основная часть межпланетной пыли — это тонкозернистый материал, подобный углистым хондритам, но отличающийся от обычных метеоритов по минеральному составу и строению. Исследованные типичные экземпляры межпланетных частиц представляют, по всей видимости, то же вещество, что и вещество большого числа кометных частиц, непрерывно попадавших в атмосферу Земли за время существования Солнечной системы. Если в кометах нет твердых материалов, подобных горным породам, таких материалов, которые образуют метеориты, то пыль представляет собой единственно возможную форму, в которой органические вещества комет могли поступать в земную атмосферу.

## I. Введение

Можно считать, что вещество комет состоит из двух компонентов, по разному ведущих себя в межпланетной среде после выделения из ядра кометы. Один компонент летуч и на расстояниях порядка 1 а. е. от Солнца рассеивается в пространстве в виде ионов. Другой компонент относительно стабилен и сохраняется как межпланетная пыль. Пылевой компонент содержит главным образом элементы комет более тяжелые, чем кислород, но имеет также и некоторую долю легких атомов. В свете проблемы возникновения жизни интерес к кометной пыли понятен, так как на ней органические вещества, выделенные кометами, могут сохраняться достаточно продолжительное время в космическом пространстве. Кроме того, в такой форме кометные материалы могут входить в планетные атмосферы не подвергаясь распаду. Если кометы действительно несут жизнь, то ее непосредственными переносчиками могут оказаться частицы кометной пыли.

## II. Кометная пыль как межпланетные частицы

При выделении из кометных ядер пыль может сразу покидать Солнечную систему, что обычно происходит при ее выбро-

<sup>1)</sup> Отдел астрономии Вашингтонского университета, США.

сах из новых или долгопериодических комет, или же переходить на ограниченные околосолнечные траектории. Частицы на ограниченных траекториях будут испытывать торможение Пойнтинга — Робертсона, под действием чего начнут двигаться по спирали в направлении Солнца и перейдут на замкнутые орбиты. Некоторые из этих частиц будут сталкиваться с планетами, но основная их часть будет разрушаться во взаимных столкновениях за характерное время  $10^4$ — $10^5$  лет [6]. После таких столкновений обломки размером меньше нескольких микрон будут уходить в межзвездную среду под действием давления солнечного излучения, чтобы сформировать будущие поколения звезд, планет и в каких-то случаях — комет.

### III. Сбор межпланетной пыли

В некотором интервале размеров частиц их вход в атмосферу может происходить без сильного разогрева; такие частицы могут быть собраны для анализа. Пылевые частицы размером меньше 50 мкм могут быть собраны в стратосфере, например с самолетов У-2 [2], а значительно большее количество менее чистых частиц может быть собрано со дна морей [5]. Анализ этих образцов дает детальную информацию непосредственно о сохранении вещества комет, поступающего в атмосферы планет земной группы. В настоящее время проведен анализ около 1000 частиц внеземного происхождения размерами от 2 мкм до 3 мм. Вероятным источником большинства таких частиц являются короткопериодические кометы, однако некоторые из них могут иметь и астероидное происхождение. Более определенно можно сказать о происхождении межпланетных частиц с размерами порядка миллиметров — они становятся видимыми метеорами. Измеренные параметры метеорных орбит указывают на то, что основная часть метеоров представляет собой обломки разрушившихся комет [10].

### IV. Вход в атмосферу кометных метеорных частиц

Сохраняется ли межпланетная пыль при ее взаимодействии с атмосферой? Этот вопрос очень важен, поскольку такая пыль является, вероятно, основной формой кометного материала, собираемого Землей. За год Земля собирает свыше  $10^4$  т межпланетной пыли. Все эти материалы будут попадать в атмосферу со скоростями, большими скорости убегания, так что главный вопрос, касающийся возможной роли комет в происхождении жизни на Земле, заключается в том, могут ли при этом сохраняться органические соединения. Как показал анализ собранных

образцов, несмотря на высокие скорости входа в атмосферу, некоторые частицы размерами от 2 мкм до 1 мм не нагреваются в атмосфере до больших температур. Так как в малых частицах не может возникнуть больших температурных градиентов, то сильного разогрева не испытывает не только центральная часть, но и вся частица целиком. Слабый нагрев при входе в атмосферу за счет трения может наблюдаться только в том случае, когда частицы гасят свои космические скорости на очень больших высотах. Если принять, что интересующие нас органические вещества распадаются при температуре 400 К, то условие их сохранения требует, чтобы частицы затормаживались на высотах, больших примерно 100 км. На этих высотах энергия, выделяемая при трении, может компенсироваться тепловым излучением, когда температура меньше 500 К. Можно считать, что пылевые частицы внеземного происхождения, тормозящиеся при входе в атмосферу, теряют свою первоначальную скорость после столкновения с числом атмосферных молекул, общая масса которых составляет несколько собственных масс частицы. Параметрами, которые определяют, как глубоко проникнет в атмосферу частица, пока не испытает определенного числа столкновений с молекулами, является отношение площади поверхности частицы к ее массе, а также угол входа частицы в атмосферу. Метеорные тела размером 10 см, которые, как принято считать, образуют метеориты, не теряют своих больших скоростей, пока не проникнут до высот, меньших  $\sim 50$  км. На этих высотах давление окружающего газа достаточно высоко: метеорные тела расплавляются, во всяком случае частично, и подвергаются действию сильного динамического давления. Частицы, меньшие примерно 50 мкм, имеют достаточно большую величину отношения площади поверхности к массе; они тормозятся на высоте около 100 км обычно без плавления (речь идет о «микрометеоритах» — частицах, названных так Уипплом [12]). Помимо того что они не плавятся, они не испытывают и больших механических напряжений, поскольку при данной скорости динамическое давление пропорционально плотности окружающего газа. Хотя микрометеориты и не испытывают плавления, они нагреваются все же до больших температур, при которых изменяются многие углеродные соединения. Температуры плавления большинства каменных метеоритов, содержащих углистые хондриты, превышают  $1200^{\circ}\text{C}$ . Расчеты, выполненные в [7, 8], показали, что, по-видимому, лишь частицы, меньшие 5 мкм, могут входить в атмосферу, не нагреваясь выше 400 К. Итак, чтобы сохранить живые организмы, частицы должны быть по своим размерам существенно меньше 5 мкм. Частицы с очень малой плотностью, а также частицы, входящие в атмосферу под малыми углами, могут сохраняться при незначительном разогреве и при боль-

ших размерах. Среди собранных частиц только малая доля размерами  $\leq 50$  мкм испытывала плавление, а выхода из них таких летучих элементов, как натрий или сера, не было заметно. Измеренное в них содержание углерода составляет от 2 до более 15 %, что в целом сравнимо с содержанием углерода в богатых углеродом метеоритах. Вряд ли потери углерода бывают велики в частицах, типичный размер которых меньше 20 мкм. Собранные частицы с размерами, большими 100 мкм, имеют форму, близкую к шарообразной, — они были расплавлены при входе в атмосферу. Эти частицы потеряли значительное количество серы, натрия и, вероятно, углерода. Хотя основная часть этих достаточно крупных частиц была полностью расплавлена при входе в атмосферу, все же около 15 % их с размерами от 0,1 до 1,0 мм сохранило нерасплавившиеся зерна минералов. Иногда встречаются сферы с некоторым количеством реликтовых минералов, имеющих высокие точки плавления. Такие частицы размером более 100 мкм, который считается предельным для микрометеоритов, называют обычно «мини-метеоритами». Мини-метеориты — это частицы, которые входят в атмосферу без плавления, но могут и расплавиться, если входят в атмосферу по направлению, близкому к вертикали. Мини-метеориты обычно входят в атмосферу под малыми углами. Хотя они встречаются редко, пренебрегать ими ни в коем случае нельзя. Около 1 % метеорных тел размерами от 0,1 до 1,0 мм может сохраниться при входе в атмосферу при заметном уменьшении начального содержания углерода.

Ясно, что углеродистые материалы могут сохраняться при входе в атмосферу как составляющая частиц с размерами меньше миллиметра. Малая часть таких частиц не прогревается до температуры выше нескольких сотен градусов Цельсия. Многие из собранных частиц хрупки и пористы, так что, по всей видимости, никакого отбора выживающих микро- и мини-метеоритов как частиц, выдержавших значительные напряжения, не происходит. Более крупные тела проникают глубоко в атмосферу с большими скоростями и подвергаются динамическому давлению на 2—5 порядков выше давления, которое испытывают частицы, тормозящиеся выше 90 км. Это динамическое давление приводит к дроблению всех каменных метеоритов, приводя к существенному их отбору. Все собранные обычные метеориты представляют собой прочные камни. Пористые и непрочные материалы, из каких обычно сформированы микрометеориты, не сохраняются в виде объектов сантиметровых размеров. Если все кометные материалы представляют собой хрупкие и пористые частицы, то они, по-видимому, не могут сохраниться в виде объектов большего размера, чем пылинки. В принципе, если бы удалось установить, имеет ли вещество кометную природу, надо

было бы определить, являются ли какие-либо из 5000 собранных сейчас на земле метеоритов кометными обломками. К сожалению, в настоящее время не существует надежного метода, позволяющего отличить вещество комет от вещества астероидов. Тепловые процессы, происходившие с большинством обычных хондритов, по-видимому, противоречат гипотезе об их кометном происхождении. В работе [1] были приведены доводы в пользу того, что углистые хондриты также имеют не кометное происхождение. Однако вопрос о том, какую природу — кометную или астероидную имеют наиболее крупные из метеоритов, содержащие значительное количество углерода, остается пока нерешенным. Примечательно, что только 2,5% метеоритов приходится на богатые углеродом углистые хондриты [11]. Напротив, анализ собранных образцов пыли указывает на то, что 80% или более пылевых частиц размером меньше 1 мм состоят из вещества, подобного углистым хондритам. Существенно, что большая часть обнаруженных метеоритов, по-видимому, не является кометными обломками, в то время как почти все видимые метеоры имеют кометную природу.

Если кометы содержат достаточно прочные материалы, сохраняющиеся при входе в атмосферу в виде объектов обычных метеоритных размеров, то задача «засева» планет органическими веществами комет проста. Входящие в атмосферу метеорные тела размерами, большими сантиметра, могут иметь большую разность температур между внутренней частью и оплавливающейся поверхностью, что видно по сохранению аминокислот внутри достаточно малых углистых хондритов. Если в кометах нет крепких камневидных частей, то органические вещества в атмосфере планет могут вноситься только в виде пыли. При чем это должна быть обычная межпланетная пыль, а не пыль, образующаяся при распаде больших объектов в атмосфере. Пыль, создаваемая при дроблении больших тел, образуется главным образом на высотах ниже 100 км, где высокоскоростные частицы почти мгновенно раскаляются из-за высокой плотности воздуха.

#### V. Физическая природа межпланетной пыли

В ряде работ [2—4, 7, 8] были детально исследованы физические свойства собранных экземпляров межпланетной пыли. Для вопросов исследования комет и проблемы происхождения жизни с помощью этих данных можно получить важные сведения о вероятном строении кометного вещества. Исследования показывают, что большинство межпланетных частиц обычного типа представляют собой черное мелкозернистое вещество с таким же содержанием элементов, как в хондритах. Содержание серы в этих частицах аналогично содержанию ее в углистых

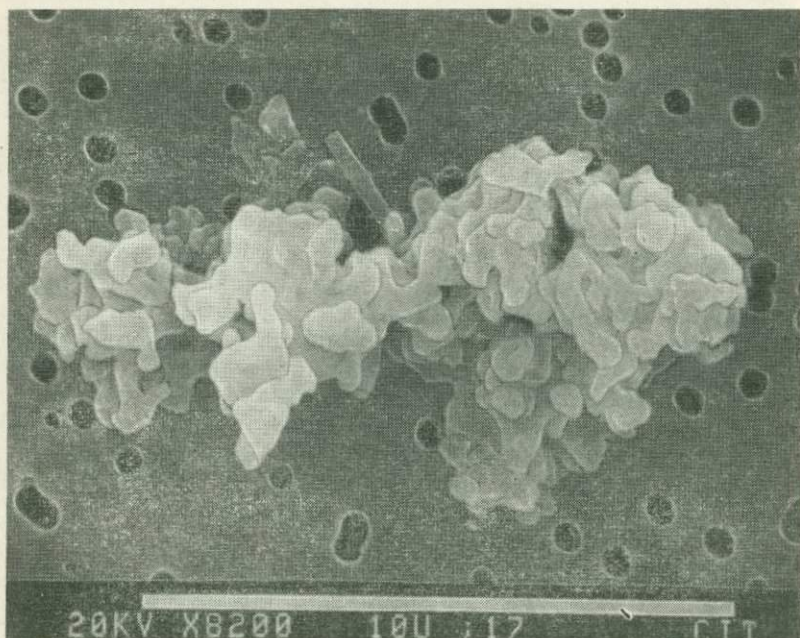


Рис. 1. Фотоснимок типичной агрегатной межпланетной частицы из числа собранных в стратосфере. Шкала 10 мкм.

хондритах типов CM и CI, так что, если классифицировать межпланетную пыль как метеориты, ее нужно относить к углистым хондритам.

Однако значительная доля частиц сильно отличается от известных видов углистых хондритов. Большинство межпланетных частиц является просто агрегатами нескольких зерен из аморфного вещества и безводных силикатов с примерно одинаковыми размерами, не превышающими микрон (рис. 1). Некоторые из этих субмикронных зерен состоят из одного вещества, другие сами являются микроагрегатами аморфных и кристаллических веществ. Почти во всех случаях такие агрегатные микрометеориты содержат несколько больших кристаллических зерен размером до нескольких микрон. В них обычно содержатся энстатиты, богатые магнием оливины и сульфиды железа, включающие никель. Изредка большие зерна представляют собой карбонаты, фосфаты или силикаты кальция и алюминия. Но больших зерен магнетитов и сульфатов, характерных для метеоритов типа CI, явно не наблюдается. Многие агрегаты очень пористы и хрупки, плотность их порядка единицы или меньше. Структура субмикронных частиц или, несколько шире, мине-

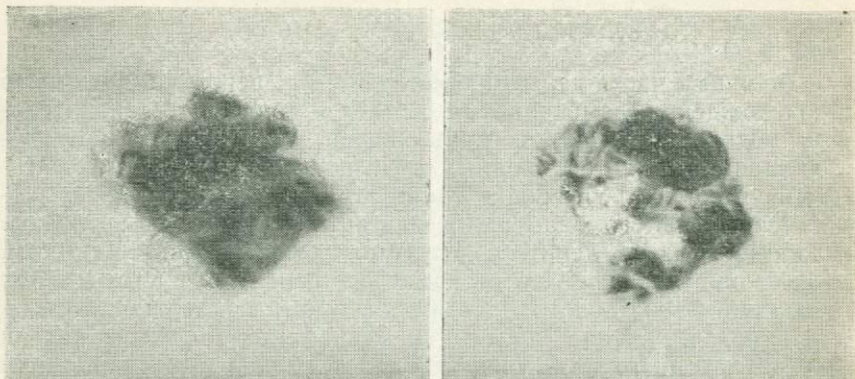


Рис. 2. Фотоснимок отдельного субмикронного зерна межпланетной пылевой частицы, подобной представленной на рис. 1. Слева показано зерно в первоначальном виде, справа — после удаления органического компонента путем обработки кислородной плазмой. Снимок получен с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Шкала 1000 А.

ральное строение межпланетных частиц значительно отличается от строения углистых метеоритов. Состав пылевых частиц довольно разнообразен и их, по-видимому, нельзя отнести непосредственно к известным типам метеоритов [8].

Важное значение для проблемы комет имеет распределение различных форм углерода в межпланетной пыли. Рис. 2 иллюстрирует первую попытку изучить распределение углерода в микрочастицах. Расчлененная на отдельные зерна частица была рассеяна по тонкой пленке  $\text{SiO}_2$ , а затем была сделана сканирующая фотография отобранных зерен с помощью электронного микроскопа до и после удаления углеродных компонентов кислородной плазмой. В такой частице весь углерод распределен по субмикронным зернам, состоящим из компонента, богатого аморфным углеродом, и очень малых силикатных вкраплений. После установки образца под плазму оставались только силикатные вкрапления. Из морфологического строения агрегата следует, что основную структуру субмикронных компонентов составляют отдельные субмикронные зерна, состоящие из микроагрегатов углеродистого вещества, а также из силикатов, из которых был сформирован исходный материал. Пока это чистая догадка, но, возможно, углеродисто-силикатные зерна образовались из межзвездных частиц типа ядро — оболочка, рассмотренных Гринбергом в настоящей книге. Хотя исследование распространенности углерода в межпланетной пыли только начато, по-видимому, обычны и оболочки зерен, и субмикронные частицы, состоящие из углеродистых веществ, в которых имеются малые кристаллические силикатные вкрапления.

## VI. Заключительные замечания

Типичные частицы межпланетной пыли, вероятно, кометного происхождения, изменчивы по составу и содержат в значительном количестве агрегаты малых зерен, по относительному содержанию элементов сходных с углистыми хондритами, богатыми углеродом. Углерод в таких агрегатах содержится в зернах очень малого размера, и частицы размером в несколько микрон выглядят черными. Частицы хрупки и часто пористы, и если они образовались из комет, то, вероятно, пустоты в них были заполнены льдом. Действительно, для поддержания существования в течение долгого времени таких пористых частиц внутри исходного тела требуется, чтобы поры были заполнены летучим твердым веществом, которое сублимирует, когда, такая частица выбрасывается в межпланетную среду. Небольшие размеры зерен, связанные с хрупкостью их агрегатов, говорят о том, что в ледяной смеси они должны быть, по-видимому, хорошо перемешаны вплоть до очень малых масштабов. Лед, смешанный с пылью в соотношении 1:1, представляет собой черную смесь. После сублимации такого льда, заполняющего пространство пор в пылевых агрегатах, его нелетучие вещества должны оставаться на зернах пыли.

Межпланетная пыль представляет собой, вероятно, основную форму, в которой вещество комет может, не разрушаясь, попасть в атмосферу планет земной группы. Если комета не содержит больших камней, способных сохраняться при входе в атмосферу, то единственным видом кометного вещества, которое сохраняется без расплавления или испарения, должна быть пыль. Хотя и в некоторой доле частиц миллиметровых размеров углерод остается, сохраняется он только в частицах размером примерно от нескольких единиц до десятков микрон.

Кратеры от ударов микрометеоритов обнаружены в пробах лунного грунта, взятых на глубине, а также на поверхностях внутренних частей некоторых богатых газами метеоритов — и те и другие в течение долгих веков подвергались воздействию межпланетной среды. Наличие этих кратеров говорит о том, что межпланетная пыль имела в течение всего периода существования Солнечной системы. Следовательно, межпланетная пыль представляет собой кометный материал, непрерывно поставляемый в планетные атмосферы в течение всего этого времени. Если кометное облако Оорта состоит из обломков, возникших в процессе образования планет в солнечной туманности, то кометы являются, вероятно, обычным явлением во Вселенной, связанным с формированием планетных систем. Где есть кометы, должна иметься пыль, а кометное вещество в форме пыли может быть всеобщей «амброзией», попадающей в планетные ат-

мосферы. Если кометы состоят из частиц межзвездной материи, то, возможно, состав этой пыли будет иметь в основном одинаковый характер в любой планетной системе.

### Литература

- 1 *Anders E.* *Icarus*, **24**, 363—371, 1975.
- 2 *Brownlee D. E., Tomandl D. A., Olszewski E.* *Proc. Lunar Sci. Conf.* 8th, 149—160, 1977.
- 3 *Brownlee D. E.* *Rev. of Geophys. and Space Phys.* **17**, 1735—1742, 1979.
- 4 *Brownlee D. E., Pilachowsky L., Olszewsky E. and Hodge P. W.* *In: Solid Particles in the Solar System*, *I. Halliday and B. A. McIntosh* (eds.), D. Reidel, 333—342, 1980.
- 5 *Brownlee D. E.* *In: The Sea*, Vol. 7, *C. Emiliani* (ed.), Wiley & Sons, New York (in press), 1981.
- 6 *Dohnanyi J. S.* *In: Cosmic Dust*, *J. A. M. McDonnell*, Wiley & Sons, New York, 527—600. *Fraundorf P. and Shirek J.* *Proc. Lunar Planet. Sci. c. f.* 10th, 951—976, 1979.
- 7 *Fraundorf P.* *Geophys. Res. Lett.*, 1980.
- 8 *Fraundorf P.* *Geochim. Cosmochim. Acta* (in press), 1980.
- 9 *Hudson B., Flynn G. L., Fraundorf P., Hohenberg C. M. and Shirek J.* *Science* (in press), 1980.
- 10 *Millman P. M.* *In: The Dusty Universe*, *G. B. Field and A. G. W. Cameron* (eds.), Neale Watson, New York, 185, 1975.
- 11 *Wasson J. T.* *Meteorites*, Springer-Verlag, New York, 1974.
- 12 *Whipple F. W.* *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **37**, 19—30, 1951.

# Взаимодействие комет с межпланетной средой

Д. А. Мендис<sup>1)</sup>

В статье рассматривается взаимодействие солнечного ветра и солнечного излучения с кометами при их движении вокруг Солнца. Показано, что природа такого взаимодействия очень разнообразна. Нейтральные частицы комет могут играть главную роль в торможении солнечного ветра, в частности в условиях «спокойного» солнечного ветра. Вследствие этого ионосфера комет оказывается обычно слабо сжатой солнечным ветром, хотя она может сильно сдуваться его высокоскоростным потоком.

Широко распространена точка зрения, что солнечный ветер постепенно замедляется впереди внешнего фронта ударной волны вследствие загрязнения его тяжелыми кометными ионами. Однако это не всегда верно. В некоторых условиях нейтралы комет не могут проникнуть в ионопаузу и их взаимодействия с солнечным ветром впереди нее не происходит. В таком случае солнечный ветер тормозится сильной ударной волной ( $M \approx 2$ ), которая всегда имеется в других условиях.

Кометные ионы в любом случае будут заторможены и обращены в хвост сильной «внутренней» ударной волной, природа которой бывает различна. Когда нейтралы кометы не могут проникнуть в ионопаузу, эта внутренняя ударная волна имеет специфический вид. Она становится гибридной ионно-нейтральной ударной волной, в которой тормозятся и обращаются в хвост не только ионы, но и нейтралы.

Сильные внешние ударные волны и ионно-нейтральные внутренние ударные волны возникают только тогда, когда комета подходит достаточно близко к Солнцу ( $d \leq d_c$ ). Для «средних» комет ( $R_n \approx 1$  км) с преобладанием  $H_2O$   $d_c \geq 0,75$  а. е., в то время как для комет с преобладанием  $CO_2$  или  $CO$   $d_c \geq 2-3$  а. е.

В работе рассмотрено также прямое взаимодействие солнечного ветра и ультрафиолетового излучения с кометным ядром, когда комета достаточно удалена от Солнца ( $\geq 5$  а. е.). Показано, что большая часть освещенной Солнцем полусферы ядра приобретает заметный положительный электростатический по-

<sup>1)</sup> Отделение электротехники и вычислительной техники и Центр астрофизических и космических исследований Калифорнийского университета, Лас-Холья, шт. Калифорния 92093, США.

тенциал ( $\approx 5$  В), в то время как теневая сторона будет иметь отрицательный потенциал, значительно больший по величине ( $\approx -1$  кВ). В результате образования таких потенциалов и действия соответствующих электрических полей тонкая пыль, если она имелаась на поверхности после выделения из ядра, будет подниматься над ядром. Самые малые зерна ( $R_g \leq 0,1$  мкм) могут совсем «сдуваться» с поверхности. В результате этого процесса комета может выделять некоторую порцию пылевой материи, которой была покрыта, и в отсутствие каких-либо обдувающих газов при больших гелиоцентрических расстояниях.

## 1. Введение

В этой работе рассматривается взаимодействие межпланетной среды с кометой при ее движении вокруг Солнца. Под межпланетной средой понимается солнечная радиация и солнечный ветер. Другой компонент межпланетной среды, а именно пыль, не будет рассматриваться, так как взаимодействие комет с нею происходит редко и не приводит, по-видимому, к заметным эффектам.

Существуют два следующих важных аспекта такого взаимодействия. Во-первых, это многообразные химические атмосферные и ионосферные процессы, которых мы не будем здесь касаться. Во-вторых, это динамика атмосферы и ионосферы кометы и процессы взаимодействия солнечного ветра с кометной атмосферой.

Мы будем рассматривать различную природу такого взаимодействия в различных положениях кометы при ее движении вокруг Солнца и покажем, что принятая сейчас модель этого взаимодействия не является универсально применимой. Будет рассмотрено также действие солнечного ветра и солнечного излучения на кометное ядро, когда оно значительно удалено от Солнца и, следовательно, не защищено собственной атмосферой. Будет показано, что в этом случае ядро может зарядиться до высокого электростатического потенциала, особенно с ночной стороны. Мы обсудим также физические эффекты, связанные с появлением этого электростатического поля, а именно: поднятие пыли, ее перенос и отток от ядра.

## 2. Общая картина взаимодействия комет с солнечным ветром

Существующую точку зрения на общий характер взаимодействия комет с солнечным ветром иллюстрирует рис. 1, на котором в конфигурацию, данную в работе [1], добавлен учет межпланетного магнитного поля и «внутренней» ударной вол-

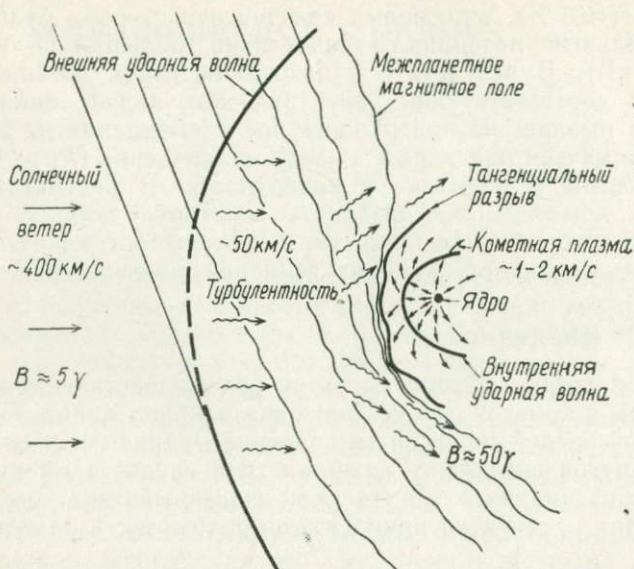


Рис. 1. Схема взаимодействия кометы с солнечным ветром.

ны. Поверхность тангенциального разрыва (или ионопауза) отделяет область, свободную от магнитного поля и содержащую ионы кометного происхождения, образовавшиеся при фотоионизации (ионосферу), от солнечного ветра. Солнечный ветер тормозится бесстолкновительной ударной волной и расходится вокруг ионосферы кометы. Вследствие загрязнения тяжелыми кометными ионами, образуемыми при перезарядке ионов солнечного ветра с кометными нейтралами, проникшими в ионопаузу, набегающий солнечный ветер может постепенно замедляться до ударной волны. Хотя этот процесс может, в принципе, вообще исключить образование внешней ударной волны, проведенные в [3, 11] детальные расчеты показали, что слабая ударная волна ( $M \approx 2$ ) сохраняется. Например, для такой кометы средней яркости, как комета Галлея, она должна существовать на расстоянии  $\approx 5 \cdot 10^5$  км от ядра при гелиоцентрическом расстоянии 1 а. е.

«Внутренняя» ударная волна появляется вследствие сильной столкновительной связи между кометными ионами и нейтралами, когда последние движутся во внутренней коме со сверхзвуковыми скоростями. Недавно была рассчитана структура кометной ионосферы при использовании для внутреннего ударного слоя аппроксимации тонкого слоя Ньютона — Буземана в трехмерной асимметричной конфигурации. Эта структура пока-

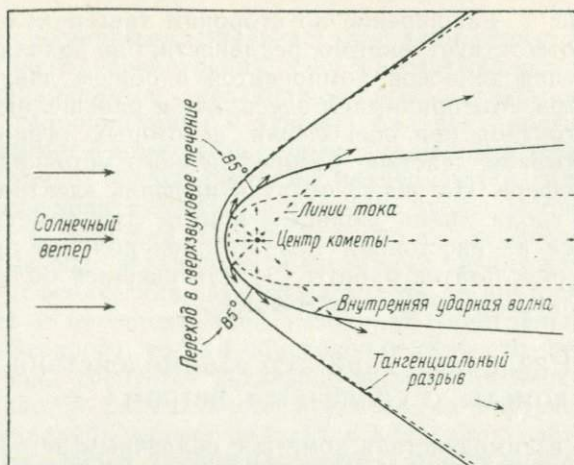


Рис. 2. Строение кометной ионосферы. Показаны внутренняя ударная волна и поверхность тангенциального разрыва (или ионопауза). Сплошные линии соответствуют центральному сферически-симметричному источнику, отдельные стрелки показывают струи вещества со стороны, обращенной к Солнцу [4].

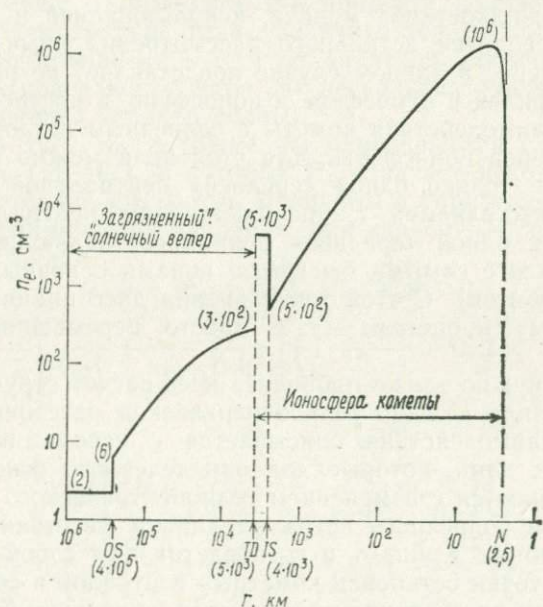


Рис. 3. Профиль электронной концентрации по линии комета — Солнце для кометы Галлея при гелиоцентрическом расстоянии 1,53 а.е. (OS — внешняя ударная волна, TD — тангенциальный разрыв, IS — внутренняя ударная волна, N — ядро).

зана на рис. 2. Расширение по сторонам тангенциального разрыва не соответствует, видимо, реальности: оно появляется из-за пренебрежения тепловой компонентой в общем давлении солнечного ветра. Мы принимаем здесь, как и раньше, аппроксимацию тонкого слоя при ослаблении некоторых ограничений, а также учитываем действие распределенного источника нейтралов в ионосфере. На рис. 3 показан профиль электронной концентрации вдоль линии Солнце — комета для кометы Галлея, находящейся на расстоянии 1,53 а. е.; он получен при комбинировании результатов работы [3] для внешней области, с нашими результатами — для внутренней.

### 3. Различный характер взаимодействия кометы с солнечным ветром

Модель взаимодействия кометы с солнечным ветром, о которой шла речь выше, не является универсальной. Недавно было изучено [7] изменение природы этого взаимодействия при изменении гелиоцентрического расстояния до кометы, а также при внезапных изменениях условий в солнечном ветре на заданном гелиоцентрическом расстоянии.

В «одножидкостной» модели, использованной в этих расчетах, не проводится детального рассмотрения химических процессов. Интерес в данном случае представляет не расчет химических профилей в атмосфере и ионосфере, а построение общей картины взаимодействия кометы с солнечным ветром и определение размеров ионосферы. Для этой цели можно принять существование только одной «средней» нейтральной составляющей (отождествляемой с преобладающим нейтральным компонентом) и одной «средней» ионной составляющей (которая ассоциируется с самыми *быстрыми* ионами основных нейтральных компонентов). С этой точки зрения диссоциация считается «внутренним» процессом — т. е. просто перемешиванием нейтралов.

Нам не нужно также проводить весь расчет структуры взаимодействия при каждом гелиоцентрическом расстоянии. Общая картина взаимодействия описывается с использованием трех масштабных длин, которые для определенного основного компонента меняются с изменением гелиоцентрического расстояния и условиями солнечного ветра на данном расстоянии. Первые две масштабные длины  $r_0$  и  $r_{i0}$  представляют собой расстояния от ядра до точки остановки кометных нейтралов и соответственно ионов; эти расстояния определяются из условия баланса полного давления солнечного ветра и давлений этих частиц. Третья масштабная длина  $R_c$  представляет собой расстояние от ядра, на котором взаимные столкновения ионов и нейтралов стано-

вятся несущественными. Значение этих длин станет очевидным из дальнейшего рассмотрения. Они рассчитывались на основе общих стационарных квазиодномерных дифференциальных уравнений гидродинамики и условий баланса давления между расширяющимися кометными газами и солнечным ветром в подсолнечной точке. Определяющими величинами в гидродинамических уравнениях являются изменения площади токовых трубок, скорость прироста массы и прироста тепловой энергии. Если первые две величины определяются непосредственно из геометрии (сферическая симметрия вплоть до внутренней ударной волны) и распределением источника (центральный источник для нейтралов), то для определения скорости прироста количества тепла требуется детальное знание химических процессов и процессов радиативного переноса во внутренней коме. Эта нетривиальная задача находится вне рамок настоящей работы, использующей «одножидкостное» приближение. Поэтому мы будем рассматривать три различных вида энергетических процессов: а) адиабатический, б) изотермический (при котором теплота поступает в систему с такой скоростью, что температура остается постоянной, несмотря на расширение) и в) сверхтепловой процесс (когда скорость прироста количества тепла такова, что температура газа увеличивается пропорционально корню из расстояния ( $t \sim r^{1/2}$ ) от значений, соответствующих температуре поверхности ядра до нескольких тысяч градусов вблизи внутренней ударной волны).

Значения  $r_0$  и  $r_{i0}$ , а также  $R_c$  определяются следующими уравнениями (1)–(7), в которых  $R_*$  означает некоторое стандартное расстояние ( $\approx 10 R_n$ ). Величины  $q$  определяют соответствующие динамические давления; они зависят от гелиоцентрического расстояния.

$$R_c = n_s R_n^2 \sigma_{\text{col}} = 2 \cdot 10^{-15} n_s R_n^2. \quad (1)$$

$$\text{а) } \frac{r_{i0}}{R_*} = \left\{ \frac{q_{i*}}{q_\infty} \left[ \frac{1}{\gamma M_*^2} + \frac{2}{(\gamma-1) M_*^2} \left[ \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_*^2 \right) \times \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \left( \frac{r_{i0}}{R_*} \right)^{(\gamma-1)} - 1 \right] \right] \right\}^{1/\gamma}. \quad (2)$$

$$\text{б) } \frac{r_{i0}}{R_*} = \left[ \frac{q_{i*}}{q_\infty} \left( \frac{1}{\gamma M_*^2} + 1 + \frac{2}{\gamma M_*^2} \ln \frac{r_{i0}}{R_*} \right) \right]. \quad (3)$$

$$\text{в) } \frac{r_{i0}}{R_*} = \left\{ \frac{q_{i*}}{q_\infty} \left[ \frac{3}{\gamma M_*^2} + \left( 1 - \frac{2}{\gamma M_*^2} \right) \left( \frac{R_*}{r_{i0}} \right)^{1/2} \right] \right\}^2. \quad (4)$$

$$\text{а) } \frac{r_0}{R_*} = \left\{ \frac{q_*}{q_\infty} \left[ \frac{1}{\gamma M_*^2} + \frac{2}{(\gamma-1) M_*^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[ \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_*^2 \right) \left( \frac{r_0}{R_*} \right)^{2(\gamma-1)} - 1 \right] \right] \right\}^{1/2\gamma}. \quad (5)$$

$$б) \quad \frac{r_0}{R_*} = \left[ \frac{q_*}{q_\infty} \left( \frac{1}{\gamma M_*^2} + 1 + \frac{4}{\gamma M_*^2} \ln \frac{r_0}{R_*} \right) \right]^{1,4}. \quad (6)$$

$$в) \quad \frac{r_0}{R_*} = \left\{ \frac{q_*}{q_\infty} \left[ \frac{7}{\gamma M_*^2} + \left( 1 + \frac{6}{\gamma M_*^2} \right) \left( \frac{R_*}{r_0} \right)^{1,2} \right] \right\}^{2/3}. \quad (7)$$

В расчетах мы будем рассматривать прежде всего ядра с преобладанием  $\text{H}_2\text{O}$  и используем два различных «средних» времени ионизации  $\tau_1$ , определенных для расстояния 1 а. е.: одно соответствует «спокойному» периоду в солнечном ветре, второе — «возмущенному», когда развивается «авроральный» процесс, описанный в работе [6]. Этот процесс связан с вторжением энергичных частиц в кометную ионосферу после увеличения и последующего разрыва поперечного к хвосту тока, что в свою очередь вызывается увеличением потока плазмы и магнитного поля в хвост в период, когда комета встречается с высокоскоростным потоком солнечного ветра.

Итак, для  $\tau_1$  мы выбираем два значения —  $5 \cdot 10^5$  с для спокойного периода и  $5 \cdot 10^4$  с — для возмущенного; второе значение выбрано в какой-то мере произвольно.

В девяти прямоугольниках на рис. 4 показано, как меняются с гелиоцентрическим расстоянием величины  $R_c$ ,  $r_0$  и  $r_{i0}$  (они рассчитаны для двух значений  $\tau_1$ ). Расчет проведен для трех различных по размеру комет ( $R_n = 1, 2,5$  и  $25$  км) при трех разновидностях энергетики процесса. Области, для которых расчет не дает точных значений величины вследствие различных упрощающих предположений, показаны на рисунке темными участками. Затененные участки прямоугольников относятся к спокойным условиям, светлые — к возмущенным. Видно, что наши результаты применимы почти во всем интересующем нас интервале гелиоцентрических расстояний, но не подходят для очень больших комет в периоды возмущений.

Чтобы продемонстрировать, как эти результаты могут быть использованы для определения размеров кометной ионосферы и для построения общей картины взаимодействия кометы с солнечным ветром, ограничимся рассмотрением одного прямоугольника, например b2, который соответствует расчету, выполненному для кометы размером  $2,5$  км с изотермически расширяющейся атмосферой. Возьмем  $d = 1$  а. е. Тогда  $r_{i0}$  (при спокойных условиях)  $\approx 10^3$  км. Если бы на рисунке не было кривых для  $r_0$  и  $R_c$ , то первое заключение состояло бы в том, что солнечный ветер может подходить к комете вплоть до этого расстояния ( $r_{i0}$ ). Однако  $R_c \approx 10^4$  км ( $> r_{i0}$  при спокойных условиях), а  $r_0 > R_c$ . Это означает следующее: вследствие столкновительного взаимодействия ионов и нейтралов внутри области размером  $R_c$  нейтралы смогут передавать свой импульс ионам

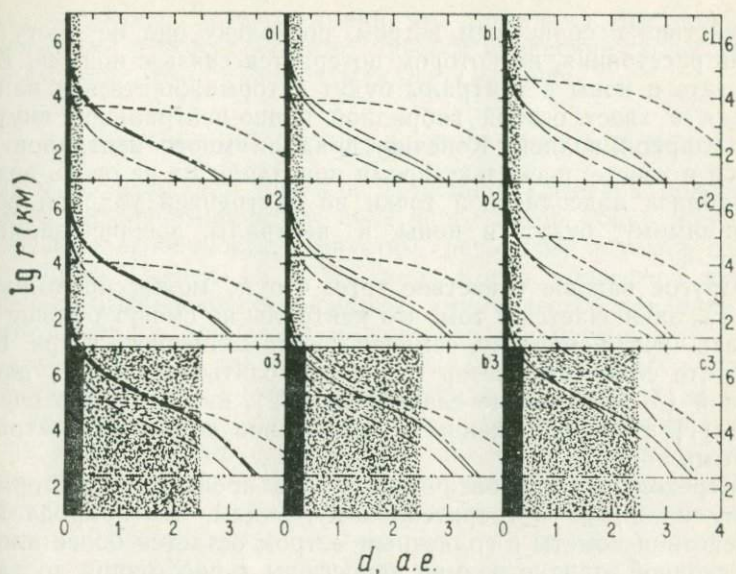


Рис. 4. Изменения с гелиоцентрическим расстоянием  $R_c$  (сплошная линия),  $r_0$  (штрихи),  $r_{i0}$  при спокойных (штрихпунктир) и возмущенных (штрихи — двойной пунктир) условиях для различных по размеру комет и различных по энергетике моделей. Прямоугольники, обозначенные цифрами 1, 2 и 3 соответственно, показывают эти величины для комет размером  $R_n = 1, 2, 5$  и 25 км. Прямоугольники, обозначенные буквами  $a, b$  и  $c$ , соответствуют адиабатическому, изотермическому и сверхтепловому расширению атмосферы [5].

во всей этой области. Следовательно, солнечный ветер будет проникать лишь до расстояния  $R_c$ . Так как  $r_0 > R_c > r_{i0}(q)$  для  $0,6 \text{ а. е.} < d < 3 \text{ а. е.}$ , то расстояние до ионопаузы будет определяться кривой  $R_c$ , а не кривой  $r_{i0}$  в этом прямоугольнике.

В этой же самой области мы будем иметь внутреннюю ударную волну в ионосфере, но следует ожидать, что область ударной волны будет более тонкой, чем вычислено в работе [4], из-за выталкивания ионов в сторону ионопаузы оттекающими нейтралами. Очень интересная ситуация возникает в области  $0,1 \text{ а. е.} \leq d \leq 0,6 \text{ а. е.}$  Здесь  $r_{i0}$  и  $r_0 < R_c$ . В таком случае, хотя взаимодействие между ионами и нейтралами происходит во всей области вплоть до  $R_c$ , ни те, ни другие не могут оказать достаточного давления на солнечный ветер, чтобы уравновесить его действие вблизи  $r = R_c$ . Следовательно, солнечный ветер будет проникать в атмосферу вплоть до  $r_0$  или  $r_{i0}$  — в зависимости от того, какое из этих расстояний больше. В этом случае нейтралы будут участвовать в гидродинамическом вза-

модействии с солнечным ветром, поскольку они не смогут достичь расстояния, на котором потеряется связь с ионами. В результате и ионы и нейтралы будут затормаживаться и направляться в хвост особой гибридной ионно-нейтральной внутренней ударной волной. Конечно, вряд ли много нейтралов окажется в хвосте, поскольку время ионизации их не очень велико. Но вблизи подсолнечной точки во внутренней ударной волне, по-видимому, будут и ионы и нейтралы, заворачиваемые в хвост.

Другое важное следствие того, что  $R_c$  может превышать и  $r_0$  и  $r_{i0}$ , заключается в том, что нейтралы не смогут больше проникать через ионопаузу, изменяя состав солнечного ветра. В результате солнечный ветер будет тормозиться сильной ударной волной ( $M = 10$ ), а не слабой ( $M = 2$ ), как это было оценено в [3, 11] в предположении о загрязнении солнечного ветра тяжелыми ионами.

Переходя от адиабатического хода процесса к изотермическому и далее — к сверхтепловому, видим, что природа взаимодействия кометы с солнечным ветром остается более или менее сходной, однако размер ионосферы и расстояния до характерных точек несколько меняются.

Как показано в прямоугольнике b2,  $r_{i0}$  во время возмущений вообще больше  $R_c$ . Следовательно, в этом случае при  $d = 1$  а. е. солнечный ветер будет проникать только до расстояния  $\sim 2 \cdot 10^4$  км от ядра.

Такие вычисления были повторены для комет с преобладанием CO и CO<sub>2</sub>, чтобы объяснить наблюдения на больших гелиоцентрических расстояниях таких комет, как комета Хьюмсона (1962 VIII). Оказалось, что в этом случае солнечный ветер будет тормозиться сильной ударной волной на всех расстояниях вплоть до 2—3 а. е., что совпадает с расчетом, выполненным для кометы размером 2,5 км в предположении об изотермичности атмосферы.

Важное следствие вывода о числе Маха в ударной волне относится к нагреву электронов на ее фронте. Как было показано в работе [11], нагрев электронов в ударной волне становится мал, если число Маха не достигает некоторого критического уровня ( $M \leq 3$ ); так, при  $M = 2$  нагрев составляет всего 10 эВ. Однако в сильной ударной волне нагрев может быть значительным, а его величина будет сильно зависеть от скорости солнечного ветра. Мы находим, что нагрев электронов в сильной ударной волне увеличивается примерно от 0,3 до 1,2 кэВ, при увеличении скорости солнечного ветра от 350 до 700 км/с. В этом случае следует ожидать увеличения электронной концентрации в результате многократной ионизации. Кроме того, будет происходить быстрая диффузия энергичных электронов

вдоль магнитных силовых линий, что приведет к быстрому развитию лучей в хвосте. На этот процесс изменение скорости солнечного ветра будет оказывать сильное влияние.

#### 4. Изменение размеров ионосферы в целом

При исследовании реакции спокойной кометной ионосферы на высокоскоростной поток солнечного ветра обнаруживаются интересные особенности. Допустим, речь идет о такой комете, как комета Галлея ( $R_n = 2,5$  км). Когда ионосфера кометы встречает высокоскоростной поток, динамическое давление солнечного ветра в ионопаузе может возрасти примерно в 5 раз. Однако, поскольку величина  $R_c > r_{i0}$  (для спокойных условий) на всех гелиоцентрических расстояниях, меньших 3 а. е., во всех трех вариантах энергетике (см. рис. 3, прямоугольники a2, b2 и c2), а также поскольку давление нейтралов достаточно, чтобы выдержать любое обычное увеличение давления солнечного ветра при всех гелиоцентрических расстояниях, больших 0,75 а. е. (и  $< 3$  а. е.), то на всем интервале  $0,75 \text{ а. е.} \leq d \leq 3 \text{ а. е.}$  ионосфера не будет сжата, т. е. размер ее будет определяться величиной  $r = R_c$ , которая резко меняется при увеличении давления солнечного ветра — см. уравнение (1).

С такими высокоскоростными потоками связано, однако, увеличение потока магнитного поля и потока плазмы в хвост. Как было сказано в разд. 3, это может привести к разрыву тока и увеличению электронной концентрации в атмосфере. Время, необходимое для развития такого «разряда», составляет 10—15 часов, начиная с начала действия высокоскоростного потока, как можно предположить по повороту лучей хвоста вокруг оси [2]. Если произошел разряд, то начинается быстрая ионизация с малым характерным временем (которое мы оцениваем в  $5 \cdot 10^4$  с). Таким образом, если мы рассматриваем, например, сверхтепловые условия (прямоугольник c2) для расстояния 1 а. е., то размер ионопаузы должен увеличиваться от  $r = R_c = 5 \cdot 10^3$  км до  $r = r_{i0}$  (при возмущенных условиях)  $= 6 \cdot 10^4$  км. Другими словами, ионосфера раздувается подобно баллону примерно в 12 раз в течение 15 ч. При этой перестройке меняется и природа взаимодействия кометы с солнечным ветром. После увеличения кометной ионосферы концентрация ионов будет уменьшаться вследствие диссоциативной рекомбинации и стремиться к величине, характерной для спокойного периода. В результате начнет уменьшаться и сама кометная ионосфера, пока не достигнет первоначального размера ( $= R_c = 5 \cdot 10^3$  км при 1 а. е.). Характерное время последующего уменьшения

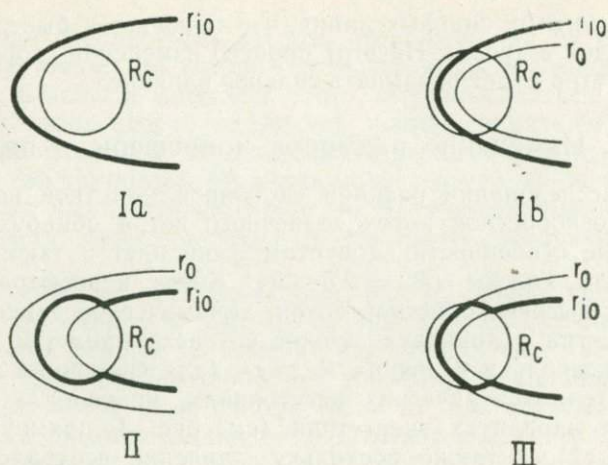


Рис. 5. Различные формы ионопаузы кометы при различных возможных соотношениях между величинами  $r_0$ ,  $r_{10}$  и  $R_c$  [5].

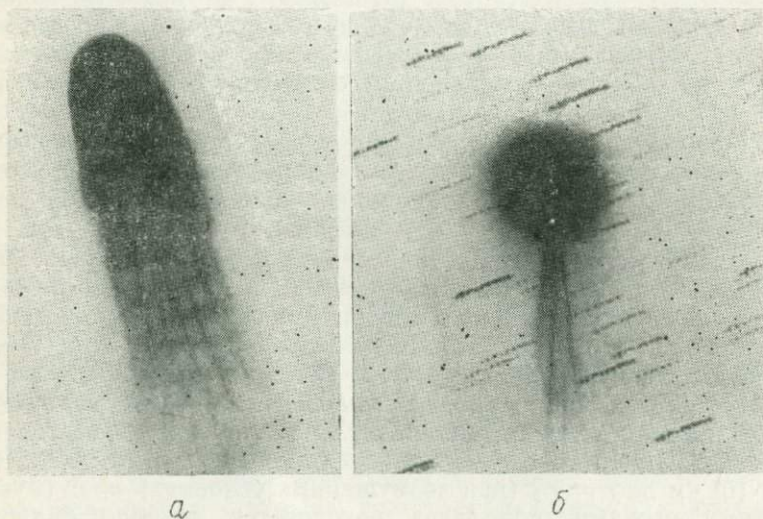


Рис. 6. Слева—комета Галлея, 1910, май 10,076; выдержка 8 мин;  $d=0,73$  а. е.;  $\Delta=0,46$  а. е.;  $\alpha=115,1^\circ$ ; справа—комета Бернхэма (1960 II) 1960, апрель 26 085; выдержка 15 мин;  $d=0,95$  а. е.;  $\Delta=0,21$ ;  $\alpha=98,3^\circ$  [9].

$(\langle n_e \rangle k)^{-1} \leq 3$  ч получаем, используя в этом выражении  $k = 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$  (например, [5]) и  $\langle n_e \rangle \leq 10^2 \text{ см}^{-3}$  [4].

Другая интересная особенность этой модели, предсказывающей колебания размеров, касается конфигурации ионосферы. До

сих пор, говоря о размере ионосферы, мы имели в виду только значения  $r_{i0}$  и  $r_0$  в подсолнечной точке. Рассматривая угловые изменения  $r_{i0}$  и  $r_0$ , можно сделать вывод, что обе эти величины растут при увеличении  $\theta$ , а форма фронта ударной волны определяется формулой  $r = r_{i0}(\theta/\sin \theta)$  [4]. На рис. 5 показаны различные конфигурации, возникающие при различных соотношениях между величинами  $r_{i0}$ ,  $r_0$  и  $R_c$ . В спокойные периоды наиболее часто наблюдается случай II (при  $r_0 > R_c > r_{i0}$ ), в то время как в возмущенные — случай Ia (при  $r_{i0} > R_c$ ).

Обе такие конфигурации, по-видимому, действительно наблюдаются в головах комет. На рис. 6 показаны снимки кометы Галлея (1910, май 10,076), когда  $d = 0,73$  а. е., и кометы Бернхэма (1960 II), (1960, апрель 26,085), когда  $d = 0,95$  а. е. Хотя соблазнительно сразу же сопоставить эти снимки с нашими моделями, следует отметить, что рис. 5 показывает характер распределения ионов, в то время как на снимках рис. 6 регистрируется, по крайней мере вблизи головы, излучение как ионов, так и нейтралов.

## 5. Непосредственное взаимодействие солнечного ветра с ядром кометы

Вопрос, которому до сих пор уделялось мало внимания и над которым мы начали работать недавно [7], — это взаимодействие солнечного ветра и потока солнечного ультрафиолетового излучения непосредственно с самим ядром кометы, когда она находится достаточно далеко от Солнца. Сейчас стало понятно, что от решения этого вопроса зависит вывод о появлении электростатического заряда на поверхности ядра, обусловленного им переноса и «сдувания» пыли, что важно, в частности, для ядер с преобладанием  $H_2O$ . На рис. 7 показаны изменения критических параметров, определяющих природу и масштабы взаимодействия кометы с солнечным ветром, при изменении гелиоцентрического расстояния. Сплошными линиями показаны расстояния проникновения солнечного ветра для комет размером 1 и 10 км. Видно, что, начиная с расстояния  $d \geq 4$  а. е., солнечный ветер достигает поверхности даже большой кометы. В этих расчетах пренебрегается конечностью гирорадиуса ионов (который составляет 10—20 км на расстояниях 2—4 а. е.). Таким образом, мы видим, что протоны солнечного ветра могут бомбардировать поверхность ядра малой кометы уже на гелиоцентрических расстояниях около 2,5 а. е.

Двумя штрихпунктирными линиями (1) и (10) показана максимальная ионная концентрация кометной ионосферы. Это

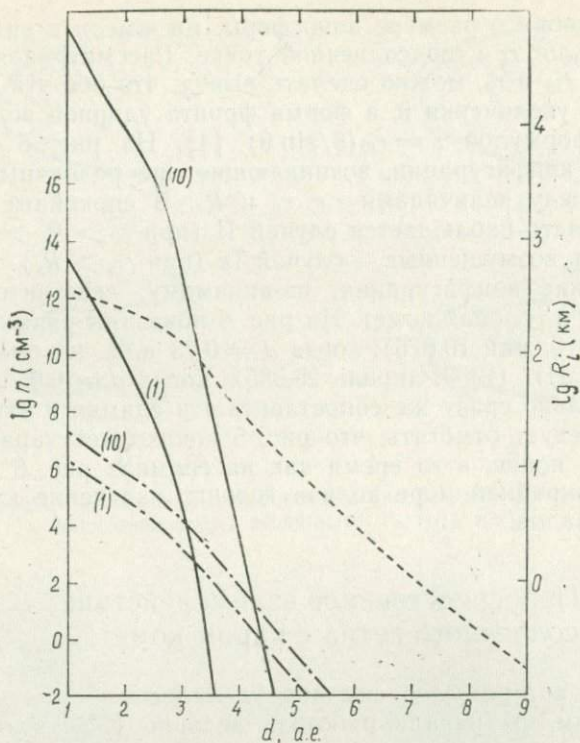


Рис. 7. Изменения с гелиоцентрическим расстоянием величин  $n_s$  (штрихи),  $R_i$  (сплошная линия);  $n_{im}$  (штрихпунктир). Числа в скобках у кривых — радиусы комет, км (Мендис и др., 1981).

значение достигается на расстоянии  $2R_n$  от центра ядра; оно определяется выражением

$$n_{im} \approx \frac{n_s R_n}{4v_{ia} \tau_1 d^2} \quad (8)$$

в котором  $v_{ia}$  — средняя скорость ионов в интервале от 1 до  $2R_n$ ,  $n_s$  — концентрация нейтралов у поверхности (также показанная на рис. 7), а  $\tau_1$  — характерное время ионизации в «спокойный» период на гелиоцентрическом расстоянии 1 а. е.

Эти кривые показывают, что максимальная концентрация ионов кометы при  $d \leq 3,5$  а. е. будет больше, чем в солнечном ветре. Связь этих ионов с солнечным ветром будет заметно ослабевать ниже по потоку солнечного ветра. Ионы могут создавать значительные возвратные токи, изменяющие равновесный потенциал поверхности. Однако при 5 а. е. даже у больших ко-

мет концентрация ионов будет незначительна по сравнению с их концентрацией в солнечном ветре.

Потоки ионов и электронов солнечного ветра, беспрепятственно достигающие поверхности кометы, представляют собой два тока, приносящих на нее электрические заряды. Другой существенный ток создается потоком фотоэлектронов с поверхности, возникающих в основном под действием солнечного ультрафиолетового излучения, которое теперь также достигает поверхности без какого-либо поглощения в атмосфере кометы.

Если предположить, что поверхность кометы, подобно лунной, представляет собой почти полный изолятор, то из условия баланса стационарного тока, а именно условия

$$I_i - I_e + I_p = 0 \quad (9)$$

в некоторой точке освещенной Солнцем поверхности, можно определить ее равновесный потенциал  $\phi_s$ .

Изменение  $\phi_s$  с  $\theta$  (углом, отсчитываемым от подсолнечной точки) для различных гелиоцентрических расстояний показано на рис. 8. Мы использовали простую политропную модель для описания изменения солнечного ветра с гелиоцентрическим расстоянием, которая предполагает возможность некоторого нагрева. Как видим, потенциал оказывается положительным, а его типичное значение выше 5 В в большей части освещенного Солнцем полушария для всех указанных на рисунке гелиоцентрических расстояний. (Максимальное значение, оцененное нами для типичной внешней ударной волны в гелиосфере, получено при 70 а. е.) Вблизи терминатора, как видим, потенциал становится большим по величине и отрицательным.

Электрический потенциал на теневой стороне рассчитать трудно из-за влияния следа, но легко видеть, что он должен быть отрицательным и большим по величине. Скорость солнечного ветра значительно превышает скорость звука для ионов, но значительно меньше ее для электронов. Значит, ионов за кометой будет немного, в то время как электроны солнечного ветра могут легко попадать на теневую поверхность, поскольку к их массовой скорости будет добавляться большая тепловая. Не вдаваясь в детали, можно оценить отрицательный потенциал на теневой стороне, учитывая, что он должен расти по величине до тех пор, пока поле не станет достаточно сильным, чтобы отклонять протоны солнечного ветра, двигающиеся около кометы и имеющие среднюю кинетическую энергию  $(1/2)m_p V_{sw}^2$ . Таким образом,  $\phi_s \approx -m_p V_{sw}^2/2e$ . При  $V_{sw} = 350$  км/с (среднее значение для низкоскоростного потока) получаем  $\phi_s \approx -630$  В, а при  $V_{sw} = 700$  км/с (среднее значение для высокоскоростного потока)  $\phi_s \approx -2540$  В. Хотя эмиссия вторичных электронов

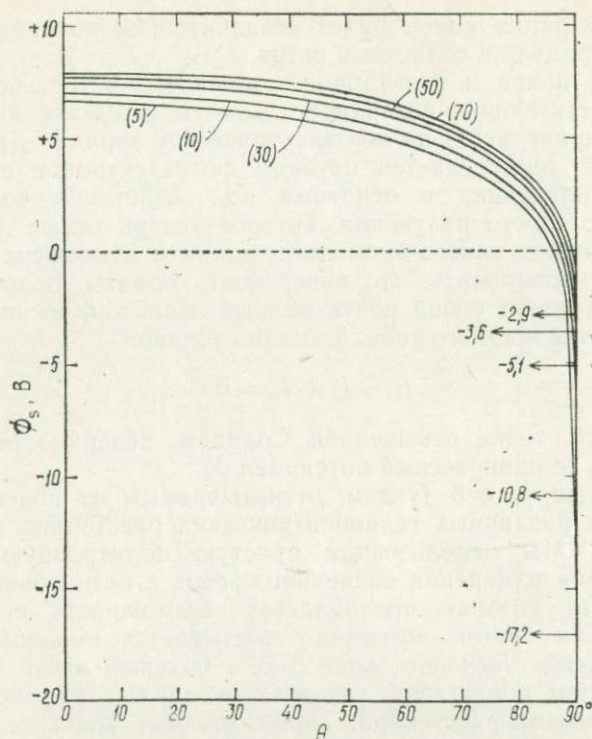


Рис. 8. Изменения электростатического потенциала  $\phi_{э}$  с углом  $\theta$  для освещенной полусферы при различных гелиоцентрических расстояниях. Числа в скобках у кривых — гелиоцентрические расстояния в астрономических единицах (Мендис и др., 1981).

может несколько уменьшить величины таких потенциалов, это уменьшение не может быть значительным, так как выход вторичных электронов при столь низких температурах невелик.

Для вычисления электрического поля на поверхности необходимо найти дебаевский радиус экранирования. Он определяется формулой

$$L = \left( \frac{kT}{4\pi n e^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Его изменение с углом  $\theta$  на освещенной Солнцем поверхности при различных гелиоцентрических расстояниях показано на рис. 9. Для значительной части полушария, освещенного Солнцем, экранирование создается не электронами солнечного ветра, а фотоэлектронами (которые имеют более высокую концентрацию, чем электроны солнечного ветра). Это существенно уменьшает дебаевский радиус экранирования по сравнению с его зна-

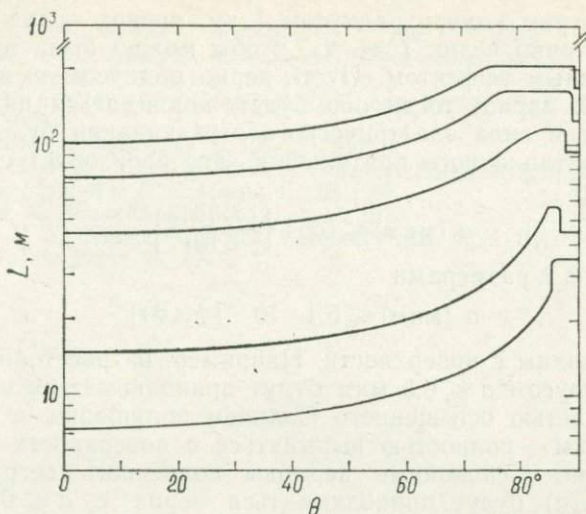


Рис. 9. Изменения дебаевского радиуса экранирования с углом  $\theta$  для освещенного полушария при различных гелиоцентрических расстояниях. Числа в скобках у кривых — гелиоцентрические расстояния в астрономических единицах (Мендис и др., 1981).

чением в солнечном ветре, а следовательно, увеличивает электрическое поле на поверхности.

Радиус дебаевского экранирования на теневой стороне рассчитать трудно, так же как и электрический потенциал, поскольку мы не знаем значений  $n_i$  — концентрации затягиваемого в след компонента. Можно, однако, утверждать, что электрическое поле на ночной стороне, по крайней мере, должно быть способно притянуть проходящие мимо ионы, и, следовательно, радиус экранирования должен быть порядка радиуса кометы.

Эти большие электрические поля и потенциалы могут вызвать значительные физические эффекты, воздействуя, в частности, на свободную пыль на поверхности. Уиппл [12] предположил, что даже новые кометы, подвергаясь действию космических лучей, могут образовывать на поверхности слой «иней» толщиной в несколько метров. Как бы то ни было, мы будем предполагать, что на поверхности кометы имеется слой тонкой свободной пыли. Когда поверхность получает заряд, зерна этой пыли также заряжаются до того же потенциала. Но этот заряд составляет лишь часть заряда, который те же частицы приобрели бы, если бы могли свободно двигаться в пространстве [10]. Заряд будет пропорционален их проекции на площадь ядра, так что лишь малая часть зерен за какое-то определенное время получит свой полный заряд.

Рассмотрим комету радиусом 1 км, период вращения которой достаточно велик ( $\geq 5$  ч), чтобы можно было пренебречь центробежным эффектом. Пусть зерно радиусом  $a$  мкм имеет единичный заряд; тогда оно будет подниматься над поверхностью, если сила электрического отталкивания будет больше силы гравитационного притяжения. Это произойдет с зёрнами, чей размер

$$a \text{ (мкм)} \leq 0,51 \left\{ \frac{|\phi_s(B)|}{L(M)} \right\}^{1/3}. \quad (11)$$

А все зёрна с размерами

$$a \text{ (мкм)} \leq 5,1 \cdot 10^{-2} |\phi_s(B)|^{1/3} \quad (12)$$

будут вырваны с поверхности. Например, на расстоянии 5 а. е. зёрна радиусом  $a \leq 0,5$  мкм будут приподниматься над значительной частью освещенного Солнцем полушария, а радиусом  $a \leq 0,1$  мкм — полностью вырываться с поверхности. На теневой стороне в спокойные периоды солнечного ветра ( $V_{sw} = 350$  км/с) будут приподниматься зёрна с  $a \leq 0,6$  мкм, а окончательно покидать поверхность — зёрна с  $a \leq 0,4$  мкм. В возмущенные периоды ( $V_{sw} = 700$  км/с) эти значения будут равны соответственно 0,9 и 0,7 мкм.

Оценка общей массы пыли, отделяемой только с освещенной стороны кометы в интервале расстояний от 70 до 5 а. е., составляет примерно  $5 \cdot 10^{12}$  г. Скорость потери массы с теневой стороны не удастся оценить подобным образом, но, во всяком случае, она может быть того же порядка, что и скорость потери с освещенной стороны. Таким образом, наша оценка составляет  $\sim 5 \cdot 10^{12} - 10^{13}$  г., что соответствует пылевой оболочке толщиной 0,5—1 м. Итак, большая часть, если не весь слой, льда может быть поднята электростатическими силами и «сдута» с поверхности на больших гелиоцентрических расстояниях даже при отсутствии какого-либо сильно летучего газа.

Я благодарю за поддержку работы, которая обеспечивалась следующими субсидиями: NASA — NSG — 7102 Геофизической и геохимической программы НАСА, NASA-NGR-05-009-110 Программы планетных атмосфер НАСА и NSF-AST-78-19008 Программы астрономии Солнечной системы Национального научного фонда США.

## Литература

1. Biermann L., Brosowski B., Schmidt H. U. Solar Phys., 1, 254, 1967.
2. Brandt J. C., Mendis D. A. Solar System Plasma Physics (and E. N. Parker, C. F. Kennel, L. J. Lanzerotti), North Holland Pub. Co., Vol. 2, 255, 1979.
3. Brosowski B., Wegmann R. Max Planck Institut Astrophysik Publ. MPI/PAI-Astro 46, 1972.

4. Houpis H. L. F., Mendis D. A. *Astrophys. J.*, **239**, 1107, 1980.
5. Houpis H. L. F., Mendis D. A. *Astrophys. J.* (in press), 1981.
6. Ip W.-H., Mendis D. A. *Icarus*, **29**, 147, 1976.
7. Mendis D. A., Hill J. R., Houpis H. L. F. and Whipple E. C., Jr. (in preparation), 1980.
8. Oppenheimer M. *Astrophys. J.*, **196**, 251, 1975.
9. Rahe J., Donn B., Wurm K. *Atlas of Cometary Forms* (NASA SP-198), 1969.
10. Singer S. F., Walker E. H. *Icarus*, **1**, 112, 1962.
11. Wallis M. K. *Planet. Space Sci.*, **21**, 1647, 1973.
12. Whipple M. K. *Comets, Asteroids, Meteorites* (Ed. A. H. Delsemme), University of Toledo Press, 25, 1977.

# Химическая кинетика в коме

У. Ф. Хюбнер<sup>1)</sup>

Физические и химические условия в коме яркой «новой» кометы зависят от состава ее ядра. В статье описаны происходящие в коме химические процессы и фотодиссоциация молекул. Эти процессы зависят от гелиоцентрического расстояния кометы, а также от расстояния в коме над ядром. По месту происхождения кометы можно разделить на два класса: кометы, появившиеся в окрестности планет-гигантов, и кометы, образовавшиеся из отдельных тел досолнечной туманности. Сравнение расчетов моделей с результатами наблюдений ком позволяет сделать некоторые выводы относительно состава ядер. Следует ожидать, что эти выводы будут уточнены по мере построения более сложных моделей и накопления более детальных результатов наблюдений. Состав, рассчитанный на основе предположения о зарождении комет в досолнечной туманности, показывает относительное содержание  $C_2$ ,  $C_3$  и  $CN$ , соответствующее результатам наблюдений.

## 1. Введение

После того, как комета Икейя — Секи (1965 VIII), которая относится к группе комет, «царапающих» Солнце, прошла через солнечную корону, она лишь немного уменьшила свою активность. Однако ядро кометы оказалось так мало — меньше нескольких десятков километров, — что его нельзя было разглядеть и в большие телескопы. Это обстоятельство говорит о том, что источник активности кометы — ее ядро — должен быть небольшим, обладая в то же время достаточной массой, что позволило бы ему сохраниться при таком приближении к Солнцу.

Построение моделей химических и физических процессов в коме начнем проводить с некоторых предположений относительно ядра, затем сравним результаты расчета моделей с наблюдениями и выведем некоторые заключения относительно действительных условий в ядре. Список компонентов, наблюдаемых в коме, приведен в табл. 1. Замерзшие летучие компо-

<sup>1)</sup> Лос-Аламосская научно-исследовательская лаборатория, Лос-Аламос, шт. Нью-Мексико, США.

ненты ядра состоят из следующих элементов: Н, С, N, О и S. Но относительное содержание и этих элементов недостаточно хорошо известно. Ионный и пылевой хвосты кометы являются продолжениями комы, образуемыми при взаимодействии солнечного ветра с кометными ионами, а также под действием давления солнечного излучения на пыль. Для наших целей они поэтому не столь важны, как сама кома.

Таблица 1

## Наблюдаемые компоненты

---

<b>Голова:</b>	H, C, O, S, CH, NH, OH, C <sub>2</sub> , CN, CO, CS, NH <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HCN, C <sub>3</sub>
	<i>Вблизи Солнца:</i> Na
	<i>В непосредственной близости от Солнца:</i>
	Si, Ca, K, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu
	<i>Пыль:</i> Силикаты
<b>Хвост:</b>	C <sup>+</sup> , CH <sup>+</sup> , OH <sup>+</sup> , CO <sup>+</sup> , CN <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>
	<i>В непосредственной близости от Солнца:</i> Ca <sup>+</sup>

---

Раньше считали, что кометы образовались в Солнечной системе где-то в окрестности Юпитера<sup>1)</sup>. В таком случае ядра должны состоять из следующих компонентов, находящихся в химическом равновесии или в условиях, близких к нему: H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> и, возможно, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> и др. (например, [12]). Теперь предполагают, что кометы образовались в досолнечной туманности или в некоторой ее части (например, [4]). Поэтому можно ожидать, что молекулы, обнаруженные в плотных межзвездных облаках, должны присутствовать и в кометах. Однако ультрафиолетовое излучение и космические лучи могли превратить некоторые из этих молекул в нелетучие тяжелые органические вещества. Даже если относительное содержание элементов Н, С, N, О и S было таким же, как и в межзвездной материи, в период формирования комет некоторые из этих атомов соединялись, образуя зерна, другие — образуя нелетучие органические соединения, но также и сильно летучие молекулы (такие, как H<sub>2</sub>, He и т. д.), которые уже никогда не конденсировались. Таким образом, мы не знаем и относительного содержания летучих фракций замороженных газов в ядре. Совсем немного известно об относительном составе этих молекул. Сведений слишком мало, поэтому наша модель сильно идеализирована:

1) Ядро кометы может быть очень неправильной формы — мы считаем его сферическим.

<sup>1)</sup> В настоящее время, как и раньше, существуют различные гипотезы происхождения комет, но наиболее общепринятой можно считать гипотезу Оорта. — *Прим. ред.*

2) Ядро может быть сильно неоднородным; с вкраплениями по поверхности и с полостями, заполненными летучими веществами, — мы предполагаем ядра однородными.

3) Ядро состоит из пыли и летучих, а также нелетучих органических молекул — мы учитываем наличие только летучих веществ.

4) Давление солнечного излучения и солнечный ветер искажают форму ком — мы принимаем кому сферической.

5) Ослабление солнечной радиации в коме зависит от угла падения — мы считаем падение радиальным.

6) Выход газа должен быть неоднородным — мы принимаем его однородным и сферически-симметричным.

## 2. Физические процессы

Солнечное излучение, падающее на ядро кометы, частично им поглощается, а частично отражается. Часть поглощенной энергии переизлучается в инфракрасном диапазоне. В зависимости от условий баланса замороженные газы могут оказаться как в твердой фазе, так и в парообразном состоянии (сублимация твердого вещества в газообразное). Большая часть поглощенной энергии при больших гелиоцентрических расстояниях переизлучается в инфракрасном диапазоне; при малых гелиоцентрических расстояниях равновесная температура будет существенно выше, так что большая часть энергии будет тратиться на сублимацию поверхностного вещества; но зависимость здесь нелинейна.

Из уравнения баланса энергии и уравнения состояния, представляющего собой уравнение Клапейрона — Клаузиуса для идеального газа, рассчитываются равновесная температура поверхности  $T$ , давление газа, его плотность  $n_0$  и скорость образования газа на единичной поверхности  $Z$  и скорость звука  $v_s$ . Эти величины рассчитывались для принятых параметров — альbedo  $A$  и лучепоглощательной способности  $\epsilon$ . Средняя скрытая теплота  $L$ , которая также входит как параметр, определяется по выбранному составу замерзших газов. По этому составу определяется также молекулярный вес  $M$  и показатель адиабаты  $\gamma$  (отношение удельных теплоемкостей). Типичными значениями будут  $A = 0,3$ ;  $\epsilon = 0,7$ ;  $L \cong 8$  ккал/моль,  $\gamma = 1,35$ ;  $M = 22$ ; и для ядра радиусом 1 км при гелиоцентрическом расстоянии 1 а.е. находим  $T = 150$  К,  $Z \cong 3 \cdot 10^{17}$  молекул/(см<sup>2</sup>·с),  $n_0 \cong \cong 4,5 \cdot 10^{13}$  молекул/см<sup>3</sup> и  $v_s = 0,3$  км/с. Начальная скорость истечения равна  $v_s/4$ .

Используя обычные законы сохранения энергии, импульса и массы, мы решаем гидродинамическую задачу при изотропном оттоке вещества от ядра. Заменяя показатель адиабаты на по-

казатель политропы, получаем решение Мизеса для сверхзвукового потока. Асимптотическое значение скорости сверхзвукового оттока (типичное значение 0,7 км/с) достигается на расстоянии от нескольких десятков до сотни радиусов ядра над его поверхностью. Важно отметить, что сохранение массы требует, чтобы плотность газа менялась по закону  $n_{i+1} = n_i (v_i/v_{i+1}) (r_i/r_{i+1})^2$ , где увеличение индекса  $i$  соответствует переходу к точке сетки в радиальном направлении от ядра. Изменения плотности заметно отклоняются от пропорциональности  $r^{-2}$  вблизи ядра.

По изменению плотности с расстоянием, сечениям фотопоглощения газовых компонентов комы и их относительному содержанию можно определить поглощение солнечного ультрафиолетового излучения. Такое поглощение, зависящее от длины волны, усреднялось по длинам волн в полосе шириной от единиц ангстрем до 50 Å. Для большинства основных родительских молекул в коме имеются данные об их поперечных сечениях. Поглощение зависит не только от расстояния до ядра, но и от угла падения солнечного света. Однако предварительные вычисления показали, что поглощение не сильно меняется при изменении угла относительно линии комета — Солнце, за исключением узкого сектора в антисолнечном направлении [7]. Интенсивность солнечного ультрафиолетового излучения важна для определения степени диссоциации и ионизации, которые вызывают химические реакции во внутренней коме.

### 3. Химические процессы

Процессы, которые мы считаем важными для инициирования и поддержания химических реакций, сведены в табл. 2. Список наименее важных из этих процессов занимает нижние строчки. В проведенные модельные вычисления включены примерно 100 фотохимических реакций, многие из которых исследованы детально, а для других, для которых недостаточно данных о поперечных сечениях, сделаны оценки. Важным процессом во внутренней коме является фотодиссоциативная ионизация (ФДИ) — процесс, в котором фотоны ионизируют молекулы в возбужденном состоянии; молекулярный ион, находившийся в возбужденном состоянии, распадается затем при диссоциации. Очень важен для образования иона  $\text{CO}^+$  глубоко в коме процесс, который там и наблюдается:  $\text{CO}_2 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{CO}^+ + e$ ; ФДИ других молекул, содержащих CO, происходит аналогично. Когда энергия фотона превышает порог ионизации, создаются горячие электроны. Эти электроны имеют достаточную энергию, чтобы вызвать новую ионизацию или диссоциацию при ударе. Аналогично электроны солнечного ветра могут создавать ионы

и радикалы, взаимодействуя с веществом комы. Эти ударные процессы, однако, не были включены в нашу модель<sup>1)</sup>. В программе имелось около 500 химических реакций, включаемых

Таблица 2

## Фотохимические процессы (с примерами)

Фотодиссоциация	$[hv + H_2O \rightarrow H + OH]$
Фотоионизация	$[hv + CO \rightarrow CO^+ + e]$
Фотодиссоциативная ионизация	$[hv + CO_2 \rightarrow O + CO^+ + e]$
Ионизация электронным ударом	$[e + N_2 \rightarrow N + N]$
Ионизация электронным ударом	$[e + CO \rightarrow CO^+ + 2e]$
Диссоциативная ионизация электронным ударом	$[e + CO_2 \rightarrow O + CO^+ + 2e]$
Ионно-обменная реакция положительного иона	$[CO^+ + H_2O \rightarrow HCO^+ + OH]$
Перезарядка с положительным ионом	$[CO^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + CO]$
Диссоциативная рекомбинация	$[C_2H^+ + e \rightarrow C_2 + H]$
Прилипание иона к нейтралу в тройных столкновениях	$[C_2H_2^+ + H_2 + M \rightarrow C_2H_4^+ + M]$
Нейтральная перегруппировка	$[N + CH \rightarrow CN + H]$
Рекомбинация нейтралов при тройных столкновениях	$[C_2H_2 + H + M \rightarrow C_2H_3 + M]$
Радиативное снятие возбуждения электронного состояния	$[\bar{O} (^1D) \rightarrow O (^3P) + hv]$
Гашение электронного состояния при электронном ударе	$[e + O (^1D) \rightarrow e + O (^3P)]$
Радиативная рекомбинация	$[e + H^+ \rightarrow H + hv]$
Стабилизированная излучением ассоциация положительный ион — нейтрал	$[C^+ + H \rightarrow CH^+ + hv]$
Рекомбинация нейтралов, стабилизированная излучением	$[C + C \rightarrow C_2 + hv]$
Ассоциативная ионизация нейтрал — нейтрал	$[CH + O \rightarrow HCO^+ + e]$

в расчет в зависимости от предполагаемого начального химического состава. Для каждого компонента записывалось дифференциальное уравнение, связывающее его с другими компонентами. Так как некоторые реакции протекают очень быстро, а другие — медленно или начинаются только после того, как необходимые реагенты образовались в других реакциях, необходимо было использовать соответствующие методы решения дифференциальных уравнений.

<sup>1)</sup> Это приближение, т. е. пренебрежение «вторичными» процессами, можно считать обоснованным ввиду их малого значения по сравнению с «первичными». Очевидно, что и без того рассматриваемая задача очень сложна и в своей постановке содержит упрощения более грубые, чем отбрасывание указанных «вторичных» процессов. — Прим. ред.

Есть две особенности, отличающие рассматриваемые химические процессы от тех, которые рассчитываются в моделях межзвездных облаков: 1) температура внутренней комы обычно порядка 150 К, что много больше температуры межзвездных облаков и что гораздо ближе к лабораторным условиям, при которых измеряются константы скоростей; 2) наши вычисления относятся к изменяющимся во времени процессам химической кинетики, в то время как для межзвездных облаков обычно решают стационарные задачи.

#### 4. Совместное протекание физических и химических процессов

Наши модельные вычисления основаны на процессах, протекающих в тонких газовых слоях комы, когда эти слои расширяются и движутся от ядра. Химические реакции поэтому протекают в газе, который становится все более разреженным, подвергаясь одновременно воздействию все более возрастающего потока ультрафиолетового солнечного излучения. Схему процесса иллюстрирует рис. 1. Для расчета химических реакций шаги по времени берутся значительно меньше, чем для гидродинамического расчета, в котором вычисляются изменения плотности и поглощение потока солнечного излучения. Шаг по времени в гидродинамическом расчете менялся приблизительно по логарифмическому закону. Лишь на больших расстояниях от ядра временной шаг в расчетах химических процессов приближался к таковому в гидродинамическом расчете. Следует иметь в виду, что в такой процедуре стационарное состояние в химическом процессе может не достигаться — разрежение газа может исключить из процесса некоторые компоненты, которые в противном случае могли бы вступать в реакцию дальше.

#### 5. Результаты

Поскольку речь зашла о происхождении жизни, мы представляем себе, что из простых молекул и радикалов в неравновесных условиях в ходе химических реакций должны образовываться все более сложные молекулы, пока не появятся соединения, характерные для биосферы. Начало этой последовательности процессов и наблюдается в кометной коме. Солнечная ультрафиолетовая радиация диссоциирует и ионизует молекулы, создавая высокоактивные компоненты, которые соединяются новыми способами, формируя все более сложные образования. Но солнечное УФ-излучение вновь эффективно диссоциирует и ионизует те соединения, которые образовались во

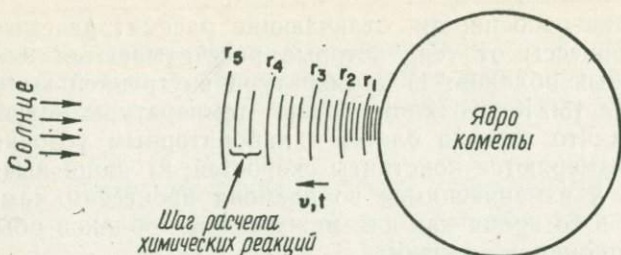
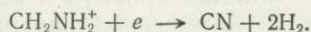
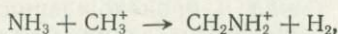
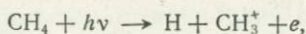


Рис. 1. Совместный расчет хода химических реакций и физического процесса расширения. Шаг по времени в расчете химической кинетики мал. Шаг по времени в гидродинамическом расчете больше ( $r_1, r_2 \dots$  — приблизительно логарифмическое изменение по  $r$ ). Для многих компонентов на гидродинамическом шаге не достигается стационарного течения химических реакций. Степень прозрачности на каждом шаге гидродинамического расчета рассчитывается в зависимости от длины волны.

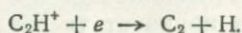
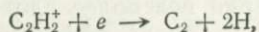
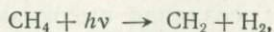
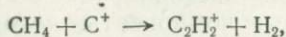
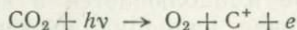
внутренней коме. Для кометы, находящейся близко к Солнцу, большая часть молекул в коме будет диссоциирована на атомы, которые в конце концов будут ионизованы.

Если за исходное в модели принять смесь веществ в ядре, находящихся в газовой фазе примерно в химическом равновесии, т. е.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  с добавкой  $\text{CO}_2$  или  $\text{CO}$  (что соответствует предположению об образовании комет в области планет-гигантов), то в расчете не получается нужного количества  $\text{C}_3$  и  $\text{C}_2$ , сравнимого с реально наблюдаемым. Образование  $\text{CN}$  соответствует на пределе реальным значениям на гелиоцентрическом расстоянии в 1 а. е., но на больших расстояниях от Солнца оказывается заниженным. (Из нейтральных компонентов  $\text{CN}$  наиболее «размазан» в видимой коме большей части комет; он является самым первым компонентом, обнаруживаемым по мере приближения кометы к Солнцу.)

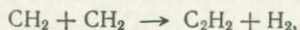
Основными механизмами образования  $\text{CN}$  из  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$  являются реакции:



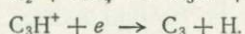
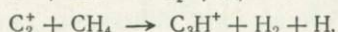
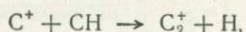
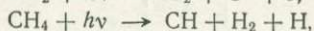
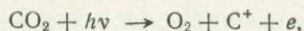
$\text{C}_2$  первоначально образуется из  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ :



Конкурирующий процесс образования  $C_2H_2^+$  для цепи реакций слева возникает из продуктов реакции, написанных справа:



$CH_4$  и  $CO_2$  образуют также  $C_3$ :



С другой стороны, если кометы были сформированы в досолнечной туманности или какой-то ее области, то замерзшие газы в ядре комет могут содержать также молекулы, которые были обнаружены в межзвездном пространстве. Принимая, что соотношение величин относительного содержания C:N:O такое же, как в межзвездной среде, а отношение H:O=2 (характерное значение, полученное из кометных наблюдений), мы рассмотрели смесь, содержащую около 90%  $H_2O$ ,  $H_2CO$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$  и несколько процентов  $N_2$  и CO, а также следы таких соединений, как HCN,  $CH_3CN$ ,  $CH_3NH_2$ ,  $H_2C_3H_2$ ,  $C_2H_2$  и  $NH_3$ . В ядрах могут оказаться и другие, более сложные органические молекулы, но они не наблюдались и в нашей модели не было необходимости их введения. Первые две из названных выше молекул в количестве следов (0,9% общей смеси) являются основными источниками CN. Источником  $C_2$  является аллен  $H_2C_3H_2$  (0,2% смеси). В модельных расчетах размер ядра принят равным 2,5 км, а для гелиоцентрического расстояния принимались величины 0,59; 1,0; и 3,0 а. е. Подробно методика расчета изложена в работе [5]. Некоторые величины содержания частиц в столбе для трех значений гелиоцентрических расстояний приведены на рис. 2. Результаты расчета CN как основного компонента согласуются с наблюдениями ярких «новых» комет. Близко соответствует наблюдениям и расчет  $C_3$  при различных расстояниях до Солнца. Необходимо отметить, что интегральное содержание CN и  $C_3$  в столбе уменьшается с увеличением расстояния до ядра, в то время как профиль  $C_2$  остается постоянным до расстояний свыше  $10^4$  км. Наблюдаемое содержание молекул в столбе является обычно значением, усредненным для расстояний порядка  $10^4$  км или даже больших. И хотя на рис. 2 видна существенная разница между профилями CN и  $C_3$ , с одной стороны, и  $C_2$  — с другой, средние содержания в столбе этих компонентов различаются мало. В работах [1—3] были проведены сравнения результатов наблюдений среднего

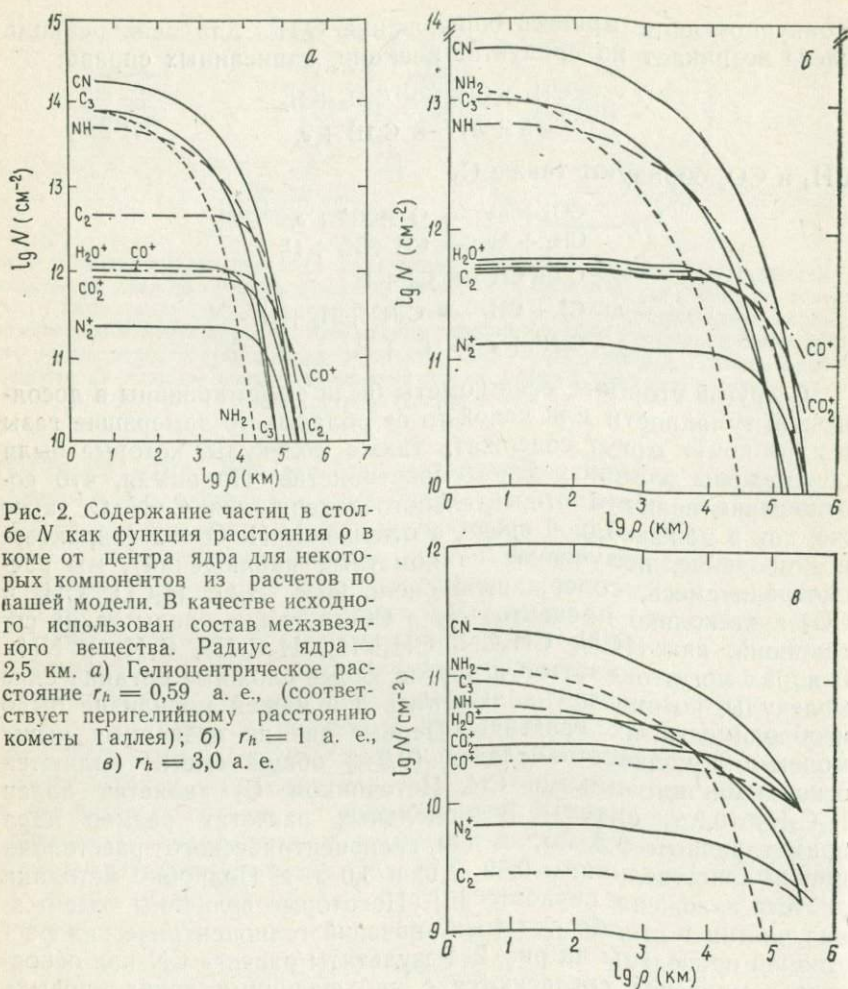


Рис. 2. Содержание частиц в столбе  $N$  как функция расстояния  $\rho$  в коме от центра ядра для некоторых компонентов из расчетов по нашей модели. В качестве исходного использован состав межзвездного вещества. Радиус ядра — 2,5 км. а) Гелиоцентрическое расстояние  $r_h = 0,59$  а. е., (соответствует перигелийному расстоянию кометы Галлея); б)  $r_h = 1$  а. е., в)  $r_h = 3,0$  а. е.

содержания в столбе с расчетами; некоторые цифры даны в табл. 3.

Как для состава, близкого к химическому равновесию, так и для состава, соответствующего межзвездному веществу, получается отношение содержаний в столбе для  $\text{CO}^+ : \text{H}_2\text{O}^+$ , близкое к единице или даже меньше. Это противоречит единственному значению, определенному из наблюдений (оно получено для кометы Когоутека), которое равно примерно 10. Неизвестно, в чем причина расхождения, но по нашей модели это отношение получается гораздо меньшим. Скорость реакции перезарядки

$\text{CO}^+$  велика, а в результате столкновений с нейтралами  $\text{CO}^+$  переходит в  $\text{CO}$ . Отношение  $\text{CO}^+ : \text{H}_2\text{O}$  увеличится, если больше водорода и кислорода будет объединяться в такие молекулы, содержащие  $\text{CO}$ , как  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HCOOH}$  и т. д., а не в молекулу воды. Но возможно, что и вода присутствует во внутренней коме в форме замерзших зерен, т. е. в газовой фазе воды меньше и поэтому ее меньше вступает в реакцию перезарядки. (Можно принять также, что воды меньше было в начальной смеси).

Таблица 3

Сравнение некоторых значений содержания частиц в столбе, полученных по наблюдениям и вычисленным в модели

Компонент	Комета	Гелиоцентрическое расстояние, а. е.	Расстояние в коме до ядра, $10^4$ км	Логарифм интегрального содержания в столбе ( $\text{см}^{-2}$ )	
				По наблюдениям [1-3]	При межзвездном составе
CN	Веста	0,6	5	12,3	12,7
		1,0	5	11,8	12,3
C <sub>2</sub>	Веста	0,6	5	12,3	12,3
		0,6	1	13,6 *)	12,6
	Когоутека	1,0	5	12,2	11,6
		1,0	3	11,5	11,6
C <sub>3</sub>	Веста	0,6	5	12,0	12,0
		1,0	5	12,2	11,7
NH <sub>2</sub>	Когоутека	1,0	3	10,8	10,7
CH	Когоутека	0,6 **)	5	11,5	10,7

\*) [9].

\*\*) После перигелия.

Тогда ледяные зерна будут испаряться на больших расстояниях от ядра, плотность молекул будет низка и, следовательно, перезарядка менее эффективна. Весьма необходимы также новые определения этого отношения на основе наблюдений.

Некоторые компоненты, не являющиеся непосредственными продуктами диссоциации принятого нами состава, но предсказываемые в определенных количествах нашей моделью, не наблюдались в кометах. Среди них  $\text{NO}$ ,  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{HCO}_2^+$ . На различных расстояниях в коме от ядра может образовываться  $\text{NO}$  по следующим двум реакциям:



Таблица 4

Образование  $\text{HCO}^+$ 

	Расстояние в коме $R$ , км			
	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
$\text{H}_2\text{CO} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{HCO}^+ + e$	1			
$\text{CO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{OH}$	2	1	4	
$\text{CH}_3^+ + \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{CH}_4$	3			
$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{OH}$	4	3		
$\text{CO}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$		2	1	2
$\text{C}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$		4	2	4
$\text{H} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{O}$			3	1
$\text{H}_2^+ + \text{CO} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$				3

Образование трех других молекул происходит в различных реакциях; табл. 4, 5 и 6 показывают, что в кометах преобладают три или четыре наиболее важные реакции, в которых образуются эти молекулы. Эти три таблицы показывают, что слишком упрощать схему химических реакций нельзя. Реакция, важная в одной части комы, может служить лишь малой добавкой к другим реакциям, образующим те же компоненты в другой части комы или при других гелиоцентрических расстояниях кометы.

Таблица 5

Образование  $\text{H}_3\text{O}^+$ 

	0,59 а. е.				1,0 а. е.				3,0 а. е.			
	А*)	Б	В	Г	А	Б	В	Г	А	Б	В	Г
$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$	1	1	3		1	1	1		1	1	1	1
$\text{HCO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}$	2	2	1		3	3	3		3			
$\text{CH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_3$	3	3			2	2			2	2	2	
$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}$				2	1				2			
$\text{OH}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}$				2			3					
$\text{H}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}$				3			1					
$\text{H}_2\text{CO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HCO}$					2				2	3	3	
$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_3$												3

\*) Расстояние в коме  $R$ , км: А— $1 \cdot 10^1$ , Б— $1 \cdot 10^4$ , В— $3 \cdot 10^4$ , Г— $1 \cdot 10^5$ .

Таблица 6

Образование  $\text{HCO}_2^+$ 

	Расстояние в коме R, км			
	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
$\text{CO}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{OH}$	1	2	2	
$\text{CO}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{H}$	2	1	1	1
$\text{CH}_4^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{CH}_3$	3	3	3	
$\text{HCO}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{H}$				3
$\text{OH}^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{O}$				2

Когда в начальный состав включаем дополнительные новые компоненты (межзвездные молекулы), то находим, что некоторые компоненты могут быть образованы прямой диссоциацией. Возникает вопрос: важны ли, собственно, химические процессы? Для ответа на него были проведены проверочные расчеты

Таблица 7

Отношение содержаний в столбе (с учетом химических процессов)/(без учета химических процессов), соответствующее расстоянию  $10^4$  км

	Гелиоцентрическое расстояние, а. е.		
	0,59	1,0	3,0
O ( $^1D$ )	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
O	1,6	1,8	2,9
C ( $^1D$ )	0,32	0,25	$7,8 \cdot 10^{-2}$
C	1,1	1,2	1,0
C <sup>+</sup>	1,0	0,93	0,91
CO <sup>+</sup>	$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,76
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,75
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,74
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,77
C <sub>2</sub>	1,4	1,1	1,03
NO	$\infty$	$\infty$	$\infty$
HCO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$\infty$	$\infty$	$\infty$
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	$\infty$	$\infty$	$\infty$

с «выключенными» химическими реакциями (исключая фотохимические процессы). Табл. 7 показывает, что химия, несомненно, играет важную роль в формировании компонентов комы.

## 6. Выводы

Разработанная модель не позволяет получить согласующиеся с наблюдениями величины содержания  $C_2$  и  $C_3$  в коме, а для CN можно говорить только о соответствии на пределе измеренных величин. Когда начальная смесь берется близкой к химическому равновесию, трудностей все же удастся избежать, если в смесь замерзших газов включить некоторые межзвездные молекулы, содержащие группы  $C_2^-$ ,  $C_3^-$  и  $CN^-$ . Однако, по-видимому, никаких свидетельств в пользу того, что кометы содержат межзвездные молекулы, нет. И если даже кометы могут действительно иметь молекулы, наблюдаемые в межзвездной среде, это не доказывает, что кометы были в ней сформированы. Компоненты, составленные из одних и тех же атомов (H, C, N и O), должны, по-видимому, давать сходные продукты при распаде и химических реакциях. Поэтому сходство кометных и межзвездных молекул может быть простым совпадением. Тот факт, что межзвездные молекулы в количестве следов могут создавать близкие к реальным содержания  $C_2$ ,  $C_3$  и CN, накладывает сильные ограничения на состав ядер.

Содержание некоторых ионов, в частности отношение содержания  $CO^+ : H_2O^+$ , еще очень мало изучено. В модели следует включать большее число физических процессов, но необходимым является также и получение большего количества экспериментальных данных.

Я благодарен П. Т. Жигэру за полезные обсуждения. Работа была выполнена под руководством министерства энергетики США и поддержана НАСА (Программа планетных атмосфер).

## Литература

1. A'Hearn M. F. *Astron. J.*, **80**, 861, 1975.
2. A'Hearn M. F. and coworkers. Private communication, 1980.
3. A'Hearn M. F., Hanish R. J. and Thurber C. H. *Astron. J.*, **85**, 74, 1980.
4. Biermann L., Michel K. W. *Moon & Planets*, **18**, 447, 1978.
5. Biermann L., Giguere P. T. and Huebner W. F. In preparation, 1981.
6. Giguere P. T., Huebner W. F. *Astrophys. J.*, **223**, 638, 1978a.
7. Giguere P. T., Huebner W. F. *Bull. A. A. S.*, **10**, 614, 1978b.
8. Huebner W. F., Giguere P. T. *Astrophys. J.*, **238**, 753, 1980.
9. Shivaraman K. R., Babu G. S. D., Bappu M. K. V. and Parthasarathy M. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **189**, 897, 1979.
10. Whipple F. L. *Astrophys. J.*, **111**, 375, 1950.
11. Whipple F. L. *Astrophys. J.*, **113**, 464, 1951.
12. Wurm K. *Die Natur der Kometen. Mitt. Hamb. Sternw.*, **8**, No. 51, 1943.

# Химическая эволюция межзвездной пыли как возможный источник предбиологического материала

Дж. М. Гринберг<sup>1)</sup>

Согласно теоретическим и лабораторным исследованиям химической эволюции холодных межзвездных пылевых частиц, на поздних стадиях сжатия межзвездного облака (ранняя протосолнечная туманность), наряду с летучими соединениями кислорода, углерода и азота с водородом, такими, как  $H_2O$ ,  $CO$  и т. д., в них присутствуют и сложные нелетучие соединения этих элементов. Можно полагать, что эти соединения являются основными компонентами состава комет, образующихся в результате аккреции межзвездной пыли.

Как показали наши лабораторные имитации воздействия светового излучения на пылевые частицы в межзвездном пространстве, около 10 % общего количества кислорода, углерода и азота, присутствующих в смеси, за  $10^7$  лет превращается в крупные молекулы с инфракрасными спектрами, характерными для карбоновых кислот и аминокрупп. Этот материал не испаряется при температурах ниже 400—500 К и растворим в воде. Измерения молекулярного веса одного из наших образцов, названного «желтым веществом», привели к значению 514 а. е. м. Хотя детальное отождествление химического состава еще не завершено, мы считаем, что отмеченные свойства явно указывают на наличие предбиологических органических молекул. Проследивая тепловую эволюцию типичной кометы, мы нашли, что кометы, приходящие из облака Оорта, должны содержать по крайней мере столько же органического вещества, сколько его содержалось в межзвездной пыли, аккреция которой привела к их образованию.

Ниже рассматриваются различные точки зрения на отложение предбиологического материала на первичной Земле. Непосредственная аккреция межзвездной пыли при прохождении Солнечной системы через плотное межзвездное облако представляется более вероятным источником молекул — предшественников жизни на Земле, чем аккреция из кометного вещества.

---

<sup>1)</sup> Лаборатория астрофизики Лейденского университета, Нидерланды.

## 1. Введение

Большое количество новых данных, касающихся первичной атмосферы Земли, ставит под вопрос гипотезу Миллера и Юри (1959) об образовании предбиологических молекул. Пока в наших представлениях о раннем периоде развития земной атмосферы и протекавших в ней процессах образования молекул, которые после ряда химических превращений привели к началу жизни, остается много неясного. Более того, изучение древнейших пород из Гренландии, проведенное С. Поннамперумой и сотрудниками в лаборатории химической эволюции Мэрилендского университета и специалистами из Гарвардского университета, Оксфордского университета и Химического института им. Макса Планка, отодвинуло в прошлое границу самых ранних следов живых существ на Земле до 3,83 млрд. лет. Поэтому мы расширяем круг рассматриваемых нами возможных источников предбиологического материала, включая в них и внеземные источники. Тема данного коллоквиума подразумевает, что в качестве одного из таких возможных источников самым серьезным образом рассматриваются кометы. Я намерен сделать следующий шаг, предложив в качестве другого источника рассматривать межзвездную пыль.

Вопрос, имеют ли кометы какое-либо отношение к происхождению жизни, зависит в конечном счете от их химического состава. Его изучение заставляет нас рассмотреть пути формирования комет из межзвездной среды в период, близкий по времени или совпадающий с временем образования Солнечной системы, а это в свою очередь ведет к вопросу о химическом составе самой межзвездной среды. В данной статье внимание будет сосредоточено на химических составляющих межзвездной пыли в период до и во время образования комет. Сначала я подведу итоги некоторых теоретических и лабораторных исследований химической эволюции в межзвездной пыли. Далее будет показано, что лабораторные результаты в сочетании с астрономическими наблюдениями приводят к заключению, что межзвездная пыль — это весьма существенный источник основных ингредиентов, в которых нуждаются предбиологические химические процессы. В конце мы рассмотрим возможные механизмы переноса этих веществ на земную поверхность, либо непосредственно из пылевых облаков в космическом пространстве, либо посредством комет. Окончательный вопрос о том, являются ли предбиологические вещества межзвездной пыли источником жизни на Земле, или обеспечение нужными веществами в нужное время и в нужных для возникновения жизни условиях было связано главным образом с процессами, осно-

ванными на химических превращениях первичной земной атмосферы, должен остаться открытым. Во всяком случае, будет показано, что межзвездная пыль вполне может отвечать условиям попадания в нужные условия, причем в нужное время. Хотя количество межзвездной пыли, отлагающейся на Землю из пылевого облака, видимо, значительно меньше, чем количество органики, которое способна образовать некоторая первичная атмосфера, межзвездная пыль имеет то преимущество, что она присутствует на гораздо более ранних стадиях эволюции Земли. Например, хотя существуют теоретические доводы (Пинто, Гладстоун, Юнг, 1980) в пользу того, что массовая скорость образования формальдегида в 100—1000 раз выше скорости аккреции межзвездной пыли (см. разд. За), нам следует иметь в виду, что прежде, чем будет достигнута степень сложности, присущая молекулам межзвездной пыли, формальдегид должен претерпеть значительную дальнейшую эволюцию. Мы можем говорить о том, что сложные молекулы, присутствующие в пыли, очень близки к той ступени, за которой следует уже биологическая эволюция. Однако проверка степени надежности этой гипотезы остается за экспериментальными исследованиями, проводимыми, в частности, в данное время в нашей лаборатории.

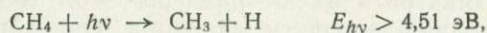
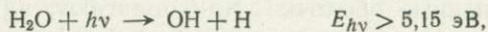
## 2. Межзвездная пыль в период, предшествующий звездообразованию

Межзвездная пыль, которая присутствует в весьма плотных облаках, развивающихся по пути образования планетных систем или комет, является конечным продуктом сложного эволюционного процесса. Мы различаем два вида пылевых частиц: крупные частицы со структурой ядро — оболочка и очень малые пылинки, лишенные оболочки. Как полагают, ядра состоят из аморфных силикатов и имеют размеры  $\sim 0,1$  мкм, а оболочки представляют собой продукты аккреции. Они характеризуются некоторым распределением по толщине и состоят из подвергшихся переработке под действием света молекул и радикалов, содержащих углерод, кислород, азот и водород, а также внешнего слоя молекул, возникающего в результате аккреции на конечных стадиях сжатия облака. Химическая эволюция наиболее значима именно в оболочках таких частиц. Наибольший средний размер частиц типа ядро — оболочка перед тем, как они начнут слипаться, составляет около 0,4 мкм. Лишенные оболочки частицы размерами от 0,01 до 0,02 мкм весьма многочисленны, но их общий вклад в массу твердого вещества в космосе, вероятно, составляет менее 5 % (см. обзор свойств межзвездной пыли [4]). Фундаментальное значение имеет то обстоятельство,

что температура пылевых частиц в межзвездном пространстве в среднем равна 10—15 К. Это составляет основу для появления у них уникальных химических свойств.

### а) Химическая эволюция пылевых частиц

Первостепенным источником химических реакций на межзвездных пылевых частицах служит океан фотонов ультрафиолетового излучения, в изобилии присутствующих даже в тех областях космического пространства, которые значительно удалены от звезд — источников этого излучения. Средний поток фотонов ультрафиолетового излучения с энергиями более 6 эВ составляет примерно  $10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Результаты воздействия этого потока представлены на рис. 1, где мы изобразили его влияние на пылинку типичных размеров, состоящую, например, из замороженной смеси воды, метана и аммиака. Просто поделив число атомов кислорода, углерода и азота в одной пылевой частице на число соударений с ультрафиолетовыми фотонами в единицу времени, мы придем к временному масштабу фотолиза, составляющему примерно 200 лет. Этот срок крайне мал по сравнению с временем жизни молекулярного пылевого облака, составляющим по общепринятым оценкам около  $10^8$  лет. Если пылевая частица охлаждена до 10—15 К, обломки молекул могут оставаться в ней в виде свободных радикалов, если они окружены другими молекулами. Такие радикалы, содержащие неспаренные электроны, крайне реакционноспособны и, находясь в непосредственной близости друг к другу, могут самопроизвольно реагировать между собой, либо восстанавливая исходную молекулу, либо создавая новые. Например, рассматривая лишь  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ , мы получим такие схемы распада молекул под действием фотонов:



но продукт, образуемый смежными радикалами, будет  $\text{CH}_3\text{OH}$ , а не  $\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{CH}_4$ . Последовательные распады и рекомбинации в смеси простых молекул позволяют получать все более и более сложные молекулы. Подобная фотопереработка молекулярных смесей будет проиллюстрирована при обсуждении лабораторных результатов. Заметим, что, если образующимися смежными молекулами в твердой фазе окажутся аминокислоты, вышеуказанный механизм дает основу для образования полипептидов. Время, в течение которого пылинки находятся в состоянии, которое разумно рассматривать как стационарное (хотя они и подвергаются существенному ультрафиолетовому облучению), вероятно, сравнимо с промежутками времени между «столкнове-

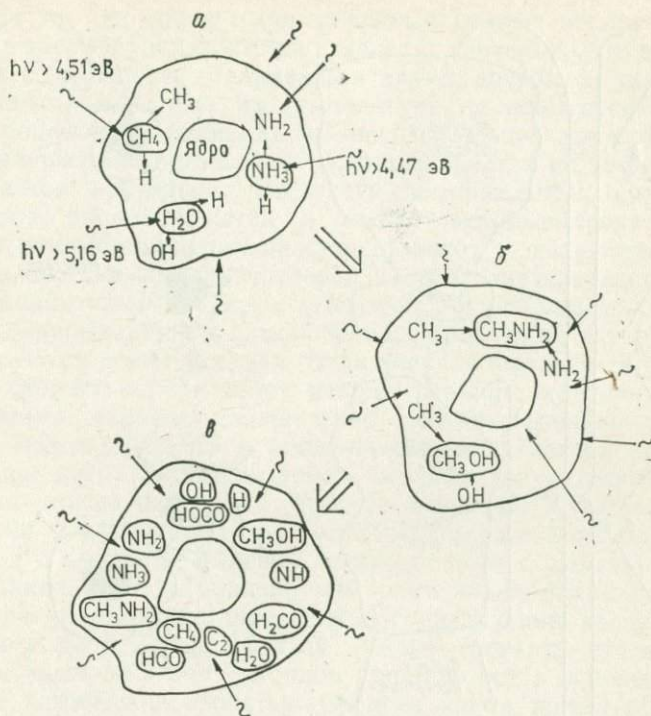


Рис. 1. Схема эволюции оболочек пылевых частиц, демонстрирующая фотолиз молекул, рекомбинацию радикалов и замораживание радикалов при низкой температуре.

ниями» облаков, составляющими около  $10^7$ — $10^6$  лет. На рис. 2 схематически показана последовательность стадий жизни пылевой частицы, причем в качестве ключевого взят процесс фотолиза в ее оболочке. Прежде всего мы начинаем с ядер, которые, согласно наблюдениям, образуются в атмосферах холодных звезд. Они отожествлены спектроскопически по абсорбционно-эмиссионной детали при 9,7 мкм, характерной для полосы Si—O, как силикатный или металлооксидный материал. Выброшенные в космическое пространство, эти пылинки служат центрами аккреции для способных к конденсации атомов и молекул межзвездного газа. Такие молекулы содержат главным образом кислород, углерод и азот благодаря высокой распространенности этих элементов в космосе. Общая распространенность этих трех элементов по отношению к водороду составляет  $12 \cdot 10^{-4}$ , а по отношению друг к другу они составляют пропорцию O : C : N = 6,8 : 3,7 : 1,1. Одновременно с аккрецией пылевая частица пронизывается фотонами ультрафиолетового излучения. Это проис-

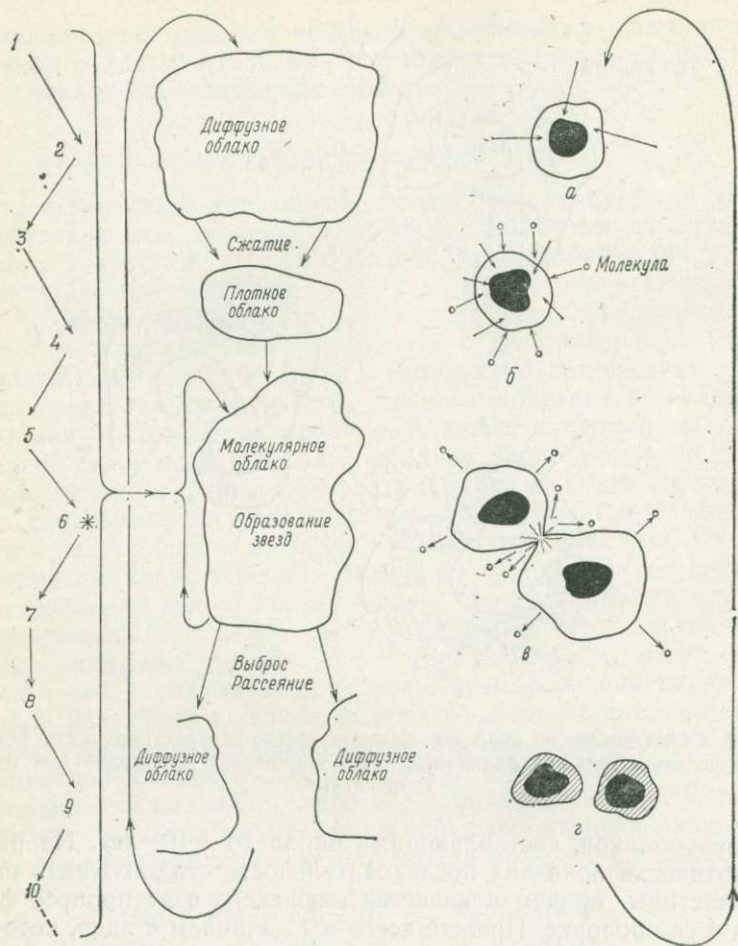


Рис. 2. Схема эволюции пылевых частиц и облаков. Последовательность, показанная слева, соответствует фазе молекулярного облака. 1 — ядро; 2 — аккреция атомов +  $h\nu$ ; 3 — ядро + оболочка; 4 — оболочка +  $h\nu =$  фотопереработка; 5 — ядро + оболочка после фотопереработки + запасенные радикалы; 6 — импульс энергии — столкновение частиц, цепная реакция; 7 — удаление оболочки при испарении или взрыве; 8 — ядро + сложная оболочка, ядро + остатки оболочки, ядро; 9 — аккреция атомов и молекул из газа +  $h\nu$ ; 10 — повторение цикла. Последовательность, показанная справа, иллюстрирует, как пылевые частицы эволюционируют, проходя через фазы молекулярного облака и образования звезд, и вновь возвращаются в фазу диффузного облака. а — облучение ультрафиолетовыми фотонами; б — аккреция атомов и молекул + облучение; в — столкновение пылевых частиц, выброс молекул, образование нелетучего «желтого остатка»; г — зерна с нелетучими оболочками.

ходит до тех пор, пока в определенный момент жизни облака, плотность и турбулентность не возрастут настолько, что пылинки получат возможность сталкиваться друг с другом со значительной частотой или пока их температура не повысится за счет иных процессов высвобождения энергии. Даже при столкновениях пылевых частиц на очень малых скоростях их температура поднимается настолько, что часть замороженных свободных радикалов высвобождается и может рекомбинировать. Поскольку рекомбинация радикалов приводит к выделению большого количества энергии, пылевая частица претерпевает заметный дополнительный нагрев, высвобождая *дополнительные* радикалы, пребывавшие в замороженном состоянии, и тем самым индуцируются новые реакции. Если энергия выделяется с достаточной скоростью, протекает цепная реакция, которая весьма существенно изменяет химический состав пылевой частицы и даже может привести к рассеиванию значительной ее части. Вслед за этим высвобождением энергии на остатках зерна повторно может протекать процесс аккреции и последующей обработки ультрафиолетом. Поскольку масштаб времени для фотолиза в оболочке пылевой частицы, даже в довольно плотных облаках, гораздо меньше, чем время жизни облака, переработка частиц под действием светового излучения является достаточно полной. Таким образом, следует ожидать, что в целом пылевые частицы в конце концов приобретают в основном одинаковые химические свойства. Среднее время жизни оболочки частицы по оценкам составляет около  $5 \cdot 10^8$  лет; это означает, что типичная оболочка проходит несколько циклов переработки внутри и вне плотного облака. Если фаза плотного облака заканчивается рассеянием его вещества и переходом вновь в фазу диффузного облака, например при выбросе, сопровождающем образование звезды, то наблюдаемые нами пылинки в диффузных облаках могли на стадии выброса находиться в весьма неблагоприятных условиях и, возможно, потеряли значительную долю своего вещества вследствие испарения или эрозии. Как мы увидим в следующем разделе, вероятность остаться в оболочке наиболее высока для сложного нелетучего остатка, образующегося в результате многократной фотопереработки пылинки во время ее пребывания в облаке. Я считаю, что именно это вещество и обеспечивает главную связь между межзвездной пылью и предбиологическими химическими процессами, если таковая существует.

Важной особенностью, отмечаемой при астрономических наблюдениях межзвездной пыли, является наличие поглощения при 3 мкм, обусловленного льдом  $H_2O$  в оболочках пылевых частиц. В следующем разделе мы увидим, что форму и положение этой полосы поглощения можно хорошо воспроизвести в ла-

боратории, используя смеси, содержащие лед  $H_2O$  [8]. Однако одна из кажущихся неувязок, требующих объяснения, заключается в том, что полоса, соответствующая льду, не всегда наблюдается в случае, когда присутствует пыль, даже если в оболочках можно ожидать значительного содержания кислорода. По-видимому, ответ может быть связан с эффектами фотопереработки оболочек пылевых частиц, если учесть, что количество льда  $H_2O$  не обязательно коррелирует с толщиной оболочки. Как будет показано в следующем разделе, поглощение, соответствующее льду, не проявляется в нелетучих молекулярных смесях даже при наличии в них достаточного количества кислорода. Итак, в оболочках пылевых частиц диффузных облаков не следует ожидать ни проявлений, ни наличия значительных количеств  $H_2O$ . Однако, согласно наблюдениям молекулярных облаков, в составе пылинок *этой* фазы межзвездной среды определенно присутствует  $H_2O$ , а также состояние пыли ближе всего к тому, чего можно ожидать в условиях предзвездного облака. Итак, присутствие  $H_2O$  в оболочках пылевых частиц является результатом аккреции, происходящей на поздних стадиях их эволюции в молекулярных облаках.

#### *б) Лабораторное моделирование эволюции межзвездной пыли*

В Лейденском университете мы впервые создали условия, в которых можно проследить и проанализировать эволюцию и фотопереработку материала оболочек пылевых частиц [7]. На рис. 3 показана схема эксперимента, а в табл. 1 приводится сравнение межзвездных условий и условий эксперимента.

В ходе отложения простых молекул, таких, как  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  и  $CO$ , на поверхности холодной подложки, или после их отложения, аналог вещества оболочек облучается фотонами от источника ультрафиолетового излучения. Обычно мы используем водородную лампу постоянного тока. Она имеет больший пик при 1600 Å и меньший, но, вероятно, существенный пик при 1216 Å ( $L\alpha$ ). Образцы подвергаются облучению различное время, и на каждой стадии регистрируются инфракрасные спектры. Мы можем также подогреть образец и затем вновь снять инфракрасный спектр поглощения. Таким образом, мы можем проследить изменения в молекулярном и радикальном составе вещества по мере того, как оно проходит цикл превращений, аналогичных претерпеваемым оболочкой межзвездной пылевой частицы в молекулярном облаке. Прежде чем продемонстрировать некоторые инфракрасные спектры вещества, подвергнувшегося фотопереработке, я сначала упомяну о некоторых крайне важных физических явлениях, наблюдававшихся в наших лабораторных образ-

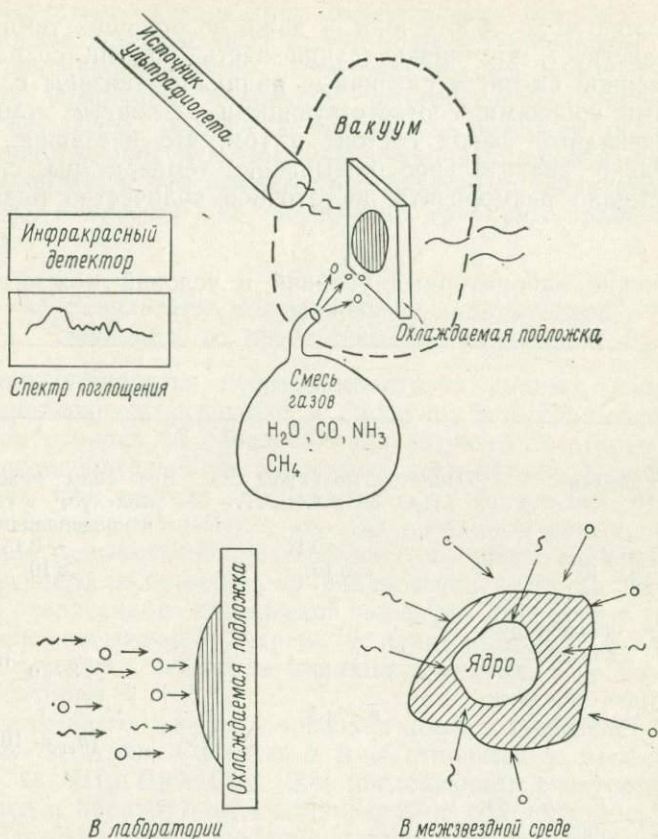


Рис. 3. Схема лабораторной модели для изучения эволюции межзвездных пылевых частиц. Молекулы накапливаются на охлаждаемой подложке в вакууме и в то же время слой облучается ультрафиолетом (см. текст). Спектр поглощения в инфракрасной области свидетельствует о появлении и исчезновении различных молекул и радикалов. В качестве охлаждаемой подложки может служить алюминиевый блок (куб со стороной около 3 см), стеклянное, сапфировое или фторид-литиевое окошко.

цах. Если за ультрафиолетовым облучением образца при 10 К следует легкое нагревание, оно сопровождается видимой люминесценцией. По мере медленного возрастания температуры можно наблюдать световые вспышки и одновременно всплески давления паров. Излучение видимого света свидетельствует о том, что в результате рекомбинации радикалов высвобождается химическая энергия. Всплески давления показывают, что часть энергии высвобождается в форме тепла, испаряющего небольшие порции образца. Тот факт, что оба этих явления наблю-

даются вплоть до 50 К и иногда даже до больших температур, свидетельствует, что значительная часть энергии сохраняется в облученной смеси, и различные радикалы связаны с энергетическими уровнями, соответствующими различным температурам. Очевидный вывод состоит в том, что внезапное, но не обязательно значительное повышение температуры способно одновременно разморозить достаточное количество радикалов,

Таблица 1

Сравнение лабораторных условий и условий межзвездной среды

	Лаборатория	Межзвездная среда
<i>Оболочка</i>		
Исходный состав	Простые молекулы CO, H <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> ...	Все виды межзвездных молекул, способных к конденсации
Толщина, мкм	$\geq 0,1$	$\sim 0,15$
Температура, К	$\geq 10$	$\geq 10$
<i>Газ</i>		
Давление конденсируемых компонентов, мбар	$8 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-17}$
Концентрация конденсируемых молекул, см <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^9$	$\frac{1}{(n_H = 10^3)}$
<i>Ультрафиолет</i>		
УФ-поток ( $E > 6$ эВ), см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> , при $\lambda < < 2000$ А	$10^{15}$	$10^8$
Эквивалентный масштаб времени	1 ч	$10^3$ лет

чтобы вызванное ими самопроизвольное выделение тепла разморозило еще большее количество радикалов и привело к цепной реакции в слое. Мы еще не проводили такой эксперимент с запуском «энергетической лавины», но полагаем, что медленные нагревания, повторяемые достаточно часто, приводят к тому же самому химическому составу.

В некоторых наших экспериментах мы уже наблюдали вспышки, приводящие буквально к взрывному удалению части образца с холодной подложки. Очевидно, взрывы, подобные этим, и конечно менее интенсивные, ответственны за выброс межзвездными пылевыми частицами более сложных молекул, наблюдавшихся в межзвездной среде радиоастрономическими методами [5]. Однако исследование этого вопроса не входит в задачи

данной статьи. Следует лишь отметить, что химическая эволюция межзвездных пылевых частиц приводит к иерархии молекул по их сложности, причем последовательность событий, в итоге которой возникают молекулы, непосредственно наблюдаемые в газовой фазе, должна неизбежно вызывать и образование нелетучего компонента, частично сохраняющегося в оболочках. Предполагается, что именно этот компонент заслуживает наибольшего внимания при обсуждении проблемы происхождения жизни.

*в) Результаты, полученные на лабораторной модели, и их приложение к межзвездной пыли*

Ниже приводится небольшая группа данных, полученных в лаборатории астрофизики в Лейдене. Эти данные выбраны с учетом вопроса об образовании нелетучего остатка в результате последовательности *повторных* воздействий, включающих: а) отложение летучих компонентов с их фотолизом, б) нагрев и в) охлаждение. Заметим, что при внезапном повышении температуры межзвездной пылевой частицы выше значения, соответствующего радиационному равновесию, вслед за высвобождением запасенной химической энергии происходит быстрое излучение избыточной энергии в пространство и охлаждение пылевой частицы в течение нескольких секунд, а не минут, как в лаборатории.

Прежде всего, на рис. 4 показана последовательность инфракрасных спектров. Спектры *а* и *д* относятся к необлученной смеси  $\text{CO}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2$ . Два последующих спектра (*б* и *е*) относятся к образцу после облучения, но без подогрева. Видно, что образуются новые молекулы и радикалы. И наконец, спектры *в* и *г* относятся к подогретому образцу. В табл. 2 представлены новые разновидности молекул и радикалов, отождествленные в облученном образце. Видно, что многие виды молекул и радикалов, найденные в газовой фазе в межзвездной среде, легко образуются в твердой фазе. В других облученных смесях были отождествлены некоторые очень важные и необычные виды молекул и радикалов. Например, полагаем, что при облучении смеси  $\text{CO}:\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3 = 4:2:2:1$  мы получили  $\text{C}_3\text{O}$ . Мы также получили характерное для  $\text{C}_2\text{H}_2$  поглощение в облученных смесях  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ . Считается, что наличие ацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) существенно для последующего образования молекул с длинной цепью.

Во всех случаях, когда мы подвергали смеси последовательным воздействиям, включающим облучение — нагрев — охлаждение — облучение и т. д., мы наблюдали образование остатка, образующегося на холодной подложке после нагревания до

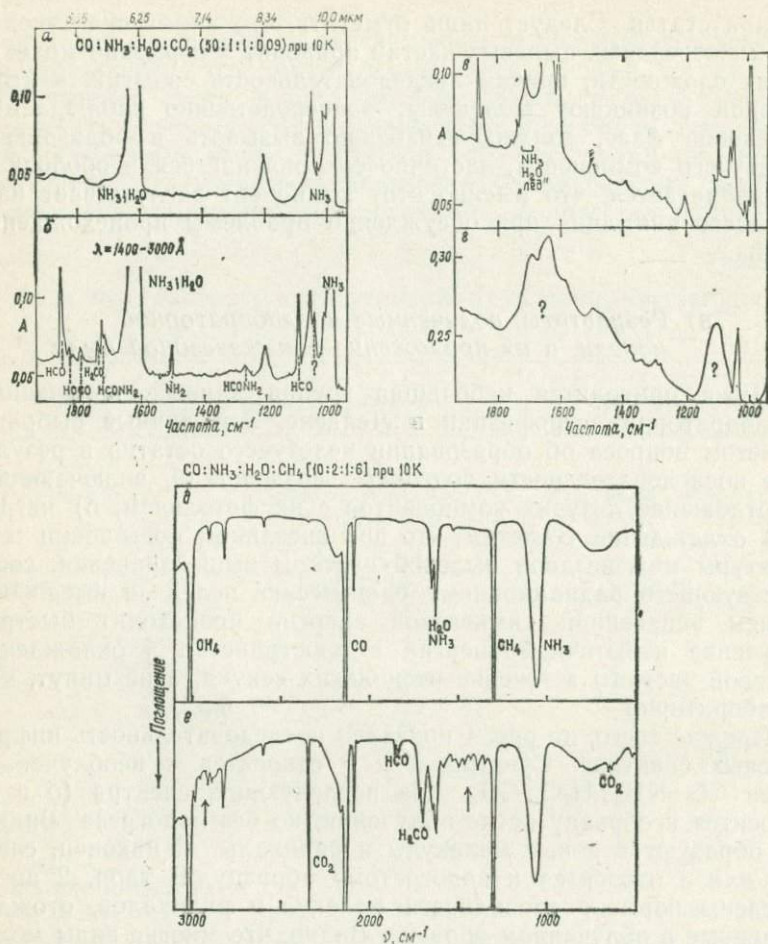


Рис. 4. Инфракрасные спектры поглощения двух образцов, имитирующих оболочки пылевых частиц. Спектры сверху слева (а, б) и внизу (д, е) демонстрируют образование новых молекул и радикалов под действием ультрафиолетового облучения. Спектры сверху справа (в, г) показывают появление новых и неотожествленных сложных молекул в ходе нагревания. а — смесь  $\text{CO}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2$  (50:1:1:0,09) при 10 К; б — 2-часовой фотолиз *in situ*; в — после нагрева до 40 К и высвечивания на 65%; г — после нагрева до 45 К и высвечивания на 100%; д — исходная смесь  $\text{CO}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$  (10:2:1:6) при 10 К; е — после фотолиза (разрешение  $1\text{ см}^{-1}$ ).

комнатной температуры (и выше). Этот остаток обычно имеет желтый или желтовато-коричневый цвет. Шесть образцов такого остатка были изучены методом инфракрасной спектроскопии. Пример одного из спектров приведен на рис. 5. В области от

$\nu = 3500$  до  $2000 \text{ см}^{-1}$  наблюдается очень широкая и плоская полоса поглощения с полушириной около  $800 \text{ см}^{-1}$ . Эта особенность характерна для всех изучавшихся нами до сих пор смесей и приводит к предположению о наличии карбоксильных групп. Заметим, что среди известных спектров аминокислот наиболее

Таблица 2

Примеры новых видов молекул и радикалов, полученных в лабораторных условиях в смесях, одновременно замороженных при  $10 \text{ К}$  и подвергшихся облучению ультрафиолетом. Следует отметить, что различия в относительных концентрациях приводят к образованию различных видов молекул. Пунктиром отделены неуверенно отождествленные молекулы. Во всех случаях присутствует множество других видов молекул, представленных неотожествленными линиями поглощения

Исходная смесь	CO H <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub> NH <sub>3</sub>	+	+	+	+
Новые молекулы и радикалы	CO <sub>2</sub> HCO H <sub>2</sub> CO CH <sub>2</sub> CO C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> C <sub>3</sub> O <sub>2</sub> — — — CO <sub>3</sub> C <sub>3</sub> O C <sub>2</sub> O H <sub>3</sub> C — X <sup>1)</sup> . . .	CO <sub>2</sub> HCO H <sub>2</sub> CO HOCO HCOOH — — — . . .	CO <sub>2</sub> HC H <sub>2</sub> CO HOCO HNCO HOCN HCONH <sub>2</sub> HNNH NH <sub>2</sub> NCO NO — — — CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O NH	CO <sub>2</sub> HCO H <sub>2</sub> CO HOCO HNCO HCOOH HCONH <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> C <sub>3</sub> O <sub>2</sub> — — — C <sub>3</sub> O H <sub>3</sub> C — X . . .	

<sup>1)</sup> H<sub>3</sub>C—X означает неуверенно отождествленные молекулы, содержащие CH<sub>3</sub>.

близкое соответствие в этой области проявляет глицин. Спектры в интервале от  $2000$  до  $1000 \text{ см}^{-1}$  сильно варьируют от образца к образцу, но среди других особенностей свидетельствуют о наличии аминогрупп. Наиболее очевидные физические свойства «желтого вещества», как мы его называем, — легкая растворимость в воде, свидетельствующая о родстве кислотам, а также устойчивость при довольно высоких температурах. Остаток не только практически не изменяется при комнатной температуре и давлении  $10^{-7}$  мбар в течение нескольких дней; для

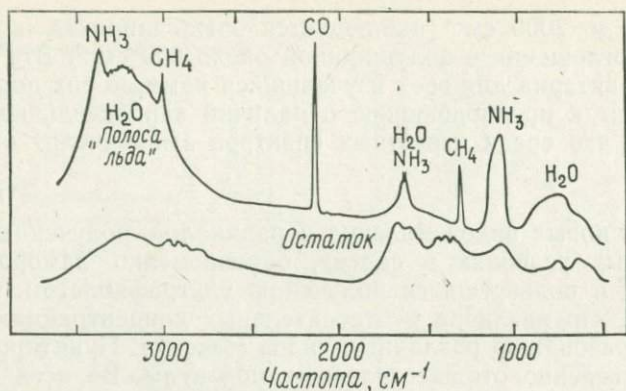


Рис. 5. Сравнение инфракрасных спектров поглощения «желтого остатка» и смеси, содержащей примерно то же количество кислорода, углерода и азота в молекулярной форме при 10 К. Заметно, что в спектре остатка полностью отсутствует полоса льда  $\text{H}_2\text{O}$  при 3,07 мкм. Нормировка спектров к равной площади в области от  $2000 \text{ см}^{-1}$  до  $1000 \text{ см}^{-1}$  приводит к уменьшению нижнего спектра в 2 раза.

того чтобы началось его испарение, требуется температура в интервале 400—500 К. Остаток в одном из наших образцов при нагревании вообще не испарялся, а подвергся пиролизу при температуре около 600 К.

Группа из Фонда фундаментальных исследований материи в Амстердаме предприняла для нас тщательное масс-спектрометрическое изучение одного из «желтых остатков». Данный конкретный образец содержал, по-видимому, только один вид молекул с молекулярным весом 514. Других пиков в спектре лазерной десорбции не наблюдалось. Хотя образование единственного вида молекул, вероятно, нельзя считать обычным результатом, я упоминаю о нем, чтобы показать, что нормальным конечным продуктом фотопереработки межзвездных пылевых частиц являются довольно крупные молекулы. Мы пока не подвергали «желтый остаток» систематическому анализу и, в частности, подробному химическому анализу, поскольку не располагали достаточным его количеством. В настоящее время мы с этой целью готовимся получить несколько крупных образцов (порядка миллиграммов). Хотя в каждом эксперименте количество образующегося остатка довольно мало, оно все же составляет значительную часть от общего количества облучаемого материала. Действительно, сравнивая относительные скорости переработки в лабораторных условиях и в условиях межзвездной среды, можно предсказать, что за период около  $10^7$  лет от 2 до 20 % вещества оболочек пылевых частиц превращается в нелетучий остаток. Это означает, что нелетучие сложные

смеси молекул, содержащих O, C и N, должны составлять значительную долю вещества оболочек межзвездных пылинок. В самом деле, нелетучих веществ образуется вполне достаточно, чтобы обеспечить весь требуемый материал оболочек пылевых частиц в среде диффузного облака.

### г) Сводные данные о свойствах пыли

Приведенные в табл. 3 данные о свойствах пыли получены из результатов астрономических наблюдений, сведений о распространенности различных химических элементов в космосе и теоретических выводов, основанных на моделировании пылевых частиц и лабораторных исследованиях.

Таблица 3

Средние характеристики межзвездной пыли<sup>1)</sup>

Тип пылинок	Количество ( $n_d/n_H$ )	Радиус ядра (1/2 размера), мкм	Радиус оболочки (1/2 размера), мкм	
			Диффузное облако	Очень плотное облако
Ядро — оболочка	$\sim 10^{-12}$	0,05	0,12	0,21
Без оболочки	$\sim 10^{-9}$	0,005	Оболочка отсутствует	

<sup>1)</sup> Основой упрощенных иллюстративных данных по частицам типа ядро—оболочка служили подробные модельные расчеты для распределения по размерам удлинненных частиц.

## 3. Аккреция межзвездного вещества на первичной Земле

Существует много механизмов, посредством которых вещество из космоса откладывалось и откладывается на Земле. Например, сразу после образования Земли ее поверхность бомбардировали огромные количества допланетного вещества, все еще оставшегося в Солнечной системе. Следы этого процесса заметны на поверхности Луны (см. обзор [1]). Более того, поскольку как полагают, Солнечная система образовалась и в течение нескольких миллионов лет оставалась внутри крупного комплекса молекулярных облаков, она должна была продолжать захватывать в этот период большие количества межзвездного вещества. Однако, учитывая современные представления о состоянии земной поверхности в столь ранний период, можно считать весьма маловероятным сохранение значительных количеств предбиологического материала или наличие подходящих

условий для начала предбиологической эволюции. С другой стороны, поскольку в настоящее время существуют данные о присутствии жизни на Земле уже около 3,83 млрд. лет назад, а возраст Земли составляет около 4,5 млрд. лет, мы должны ограничиться вопросом, как и когда на Земле могло откладываться предбиологическое вещество в эти первые 700 млн. лет.

Здесь я буду рассматривать только две возможности: а) аккреция при прохождении Солнечной системы через плотные межзвездные облака; б) кометное облако Оорта как посредник при транспортировке молекул межзвездной пыли на Землю.

#### *а) Аккреция межзвездной пыли на Землю*

Как легко видеть на фотографиях, распределение газа и пыли в межзвездном пространстве нашей Галактики весьма пестрое. Однако эта пестрота организована в спиральную структуру, так что главные скопления пыли расположены на внутренних краях спиральных рукавов [9]. Оказывается, что, находясь на определенном расстоянии от центра Галактики, Солнечная система обращается вокруг него с угловой скоростью, примерно в два раза превышающей скорость спиральной структуры. Поскольку эта структура включает два главных спиральных рукава, а период обращения Солнечной системы равен примерно 220 млн. лет, Солнце и Земля проходят через относительно высокие концентрации пыли и газа каждые 110 млн. лет. Итак, с момента образования Солнечной системы она проходила через спиральный рукав примерно 40 раз. На основе вычислений, проведенных в связи с проблемой аккреции вещества на Солнце [11], можно оценить, что в настоящую эпоху вероятность столкновения Земли с облаком, имеющим плотность водорода  $n_H \sim 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , равна примерно 0,25 при каждом прохождении через спиральный рукав. В качестве грубого приближения примем, что  $4 \cdot 10^9$  лет тому назад количество межзвездного вещества было в два раза больше, чем сейчас, так что в первые несколько сот миллионов лет вероятность встречи с облаком была примерно в два раза выше. Число облаков с  $n_H \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$  в заданном объеме пространства установлено несколько менее надежно, чем для облаков с  $n_H \sim 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  из-за эффектов наблюдательной селекции. Однако грубое приближение показывает, что число облаков падает обратно пропорционально плотности материи. Мы приходим к выводу, что в первые 700 млн. лет Земля прошла через одно очень плотное облако ( $n_H \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ ) с вероятностью порядка единицы, а прохождение через облака с плотностью  $n_H \sim 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , вероятно, совершалось 3—4 раза.

Оценка общей массы пыли и молекул, подвергшихся аккреции при прохождении через облако, дается, по существу, про-

стым расчетом, основанным на учете «заметания» пространства сечением Земли. Влиянием газовой динамики и гравитационного усиления на это явление, по-видимому, в таких оценках можно пренебречь. Скорость аккреции *сложных* молекул составляет

$$dM/dt = \alpha R_e^2 V \rho_{dm}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент порядка единицы,  $R_e$  — радиус Земли,  $V$  — скорость облака по отношению к Солнцу,  $\rho_{dm}$  — распределенная плотность оболочек межзвездных пылевых частиц. Средняя азимутальная скорость Солнечной системы относительно облака на внутреннем крае спирального рукава составляет около 10 км/с по оценкам [10], которые основаны на кинематических различиях между звездами и газом, связанным с галактической спиральной ударной волной. В целом для самих облаков существует разброс скоростей, составляющий примерно 8 км/с. Пусть оболочки пылевых частиц в молекулярных облаках содержат  $\sim 50\%$  от общего количества конденсируемых молекул, включающих O, C и N. Это примерно в два раза больше, чем в диффузных облаках, и согласуется с данными по росту пылевых частиц в плотных облаках. Итак, распределенная плотность оболочек пылевых частиц составляет около 1% от плотности водорода. Используя значения  $V = 10$  км/с,  $\rho_{dm} = 10^{-2} n_H m_H$  в уравнении (1), мы получим  $\dot{M} \geq 10^9$  г/год для  $n_H \sim 2 \cdot 10^3$  см $^{-3}$  и  $\dot{M} \geq 10^{10}$  г/год для  $n_H \sim 10^4$  см $^{-3}$  (полагая, что оболочки пылинок в облаках такой плотности должны быть крупнее средних). Время прохождения через облако радиусом 3 пс (при  $V = 10$  км/с) составляет около  $0,6 \cdot 10^6$  лет, так что общее количество накопленного материала оболочек пылевых частиц составляет  $\sim 6 \cdot 10^{14-15}$  г. Это примерно соответствует массе кометы радиусом около 1 км.

Мы пришли к заключению, что включение органических молекул газа наряду с крайне большими нелетучими органическими молекулами межзвездной пыли приводит к примерно в два раза большим значениям. Итак, общий приток сложных молекул космической пыли, имеющих предбиологический характер, при прохождении облака составляет  $10^3$ — $10^4$  т в год.

#### б) Аккреция органического вещества из комет

В статье Уиппла в этом сборнике приводятся доводы за и против того, что кометы становятся астероидами, и его вывод таков: более весомы свидетельства в пользу предположения, что внутреннее и внешние части комет имеют одинаковые физические и химические свойства. Если это на самом деле так, то можно утверждать, что кометы, проникающие в Солнечную систему из облака Оорта, несут в себе нетронутыми исходные химические

составляющие. От этой идеи нетрудно сделать следующий шаг, обращаясь к теории образования комет непосредственно из межзвездной пыли, описанной в работах [2, 3]. Тогда мы приходим к заключению, что для комет можно принять тот же химический состав, что и для предзвездной пыли, т. е. смесь, содержащую значительную долю нелетучих сложных органических молекул, как это следует из лабораторных экспериментов [6].

Перенос вещества комет на Землю в больших количествах может происходить только при прямых столкновениях. Частоту таких столкновений мы оценим, рассчитав поток комет из облака Оорта в район земной орбиты. Принимая, что в течение года появляется одна новая комета (Уиппл, 1978), получаем, что с момента образования Земли число появившихся комет составило  $\sim 4,5 \cdot 10^9$ . Если все эти кометы приближались к Солнцу на расстояние 1 а. е. по случайным направлениям, средняя плотность потока комет в районе земной орбиты определяется выражением  $\phi_{\text{ком}} (1 \text{ а. е.}) = [4\pi (1 \text{ а. е.})^2]^{-1} \text{ год}^{-1}$ . Отсюда частота столкновений с Землей, в пренебрежении гравитационной фокусировкой, составит

$$\frac{1}{4} (R_e/1 \text{ а. е.})^2 \text{ год}^{-1} = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1},$$

т. е. около 2 столкновений за  $4,5 \cdot 10^9$  лет. Если принять, что поток комет был с самого начала постоянным, а среднее число возвратов каждой кометы составляет 4,4 [12], вероятность одного столкновения Земли с кометой в первые 700 млн. лет равна около 1,5. Масса вещества, приносимого кометой радиусом 1 км, равна  $4 \cdot 10^{15}$  г, что по порядку величины совпадает с массой, накапливаемой Землей путем аккреции при прохождении через пылевое облако. Однако взрывные явления при столкновении должны сильно влиять на природу приносимого вещества, приводя к значительному пиролизу смеси и отделению летучих компонентов (включая  $\text{H}_2\text{O}$ ) от нелетучих.

#### 4. Заключение

*Средние* скорости отложения массы путем аккреции из пылевых облаков и за счет столкновений с кометами примерно одинаковы. Однако весьма важное различие этих механизмов состоит в том, когда и каким образом происходит такое отложение. Частота прохождения Земли через пылевые облака в предшествующий появлению жизни период примерно в пять раз больше частоты столкновений с кометами. Это обстоятельство наряду с экстремальными условиями, возникающими при столкновении с кометой, свидетельствует в пользу того, что межзвездная пыль является более вероятным источником молекул — предшествен-

ников жизни, чем кометы. На вопрос, достаточно ли количество пыли, содержащей далеко проэволюционировавшие сложные органические молекулы, для того, чтобы послужить началом жизни, ответить нелегко. Следует лишь отметить, что присутствие *некоторых* количеств сложных молекул на самых ранних стадиях земной эволюции, молекул, которые могли привести к живым организмам, с большей вероятностью связано с межзвездной пылью, чем с первичной атмосферой Земли.

Я приношу благодарность сотрудникам Лейденской астрофизической лаборатории — д-ру Л. Й. Алламандоле, д-ру Ф. Басс ван де Булту, В. Хагену, Л. д'Эндекуру — за разрешение упомянуть некоторые экспериментальные результаты до их публикации. Эта работа частично финансировалась дотациями Фонда фундаментальных исследований материи и Организации фундаментальных научных исследований (Нидерланды).

### Литература

1. Ashworth D. G. Cosmic Dust, ed. J. A. M. McDonnell, J. Wiley and Sons, 427, 1978.
2. Biermann L., Michel K. W. The Moon and Planets, 18, 447, 1978.
3. Cameron A. G. W. Icarus, 18, 407, 1973.
4. Greenberg J. M. Cosmic Dust, ed. J. A. M. McDonnell, J. Wiley and Sons, 187, 1978.
5. Greenberg J. M. Stars and Star System, ed. B. Westerlund, Reidel, Dordrecht, 173, 1979.
6. Greenberg J. M. The Moon and Planets, 20, 15, 1979.
7. Hagen W., Allamandola L. J., Greenberg J. M. Astrophys. and Sp. Science, 65, 215, 1979.
8. Hagen W., Tielens A. G. G. M., Greenberg J. M. Interstellar molecules, ed. B. H. Andrew, Reidel, Dordrecht, 387, 1980.
9. Lynds B. D. The spiral structure of our Galaxy, ed. W. Becker, G. Contopoulos, Reidel, Dordrecht, 26, 1970.
10. Minn Y. K., Greenberg J. M. Astron. Astrophys., 24, 393, 1973.
11. Talbot R. J. Jr., Newman M. J. Astrophys. J. Supplement, 34, 295, 1977.
12. Weissman P. R. Astron. Astrophys., 85, 191, 1980.

## Стабильные изотопы в исследовании проблемы „Кометы и происхождение жизни“

П. Эйбелл <sup>1)</sup>, Э. Фаллик <sup>2)</sup>, Н. Мак-Нафтон <sup>2)</sup>, К. Пиллинджер <sup>2)</sup>

Для установления связи между кометами и происхождением жизни потребуется значительный прогресс в наших знаниях о изотопном составе углерода в кометных телах. Приводятся предположения по получению требуемых данных на основе исследования частиц предполагаемого кометного происхождения, находимых на Земле, или из непосредственных измерений при зондировании комет.

Очень часто с различной степенью уверенности выдвигается предположение, что кометы участвовали в возникновении жизни на Земле. Вероятно, золотую середину представляет та точка зрения, согласно которой кометы могли внести вклад в состав ранней земной атмосферы и, возможно, доставили на первичную Землю органические молекулы. Привлекательная сторона этих соображений состоит в том, что кометы, по-видимому, являются наиболее ранними объектами, связанными с Солнечной системой и содержащими в заметном количестве неизменные органические молекулы, которые могли либо породить жизнь, либо обеспечить запас начального материала для биологических процессов. Прежде чем можно будет выработать реальные модели, базирующиеся на этих общих положениях, необходимо гораздо больше узнать о самих кометах. Хотя они, несомненно, содержат значительное количество углеродистого вещества, об относительном содержании в них индивидуальных соединений известно немного, а значимая информация об изотопном составе углерода в кометах практически отсутствует. Последнее особенно убийственно, поскольку соответствующие данные могли бы дать возможность *a priori* отличить кометное вещество, происходящее из Солнечной системы, от вещества из межзвездного пространства. Если бы эти данные об изотопном составе достаточно сильно отличались от земного соотношения изотопов углерода, в вопросе о вкладе кометных источников в процессы, протекавшие на первичной Земле, появились бы серьезные ограничения.

<sup>1)</sup> Химический факультет Университета шт. Род-Айленд, Кингстон, шт. Род-Айленд 02881, США.

<sup>2)</sup> Факультет наук о Земле, Кембриджский университет, Кембридж, Великобритания.

В данной статье предлагается радикальное изменение подхода к измерению соотношений стабильных изотопов, которое может способствовать получению необходимых данных.

### Химия углерода комет

В настоящее время широко принято считать, что природа комет достаточно точно описывается моделью «грязного снежка». Вероятно, во фракцию конденсированного льда вносят вклад и малые, и сложные органические молекулы; пылевую фракцию составляют, возможно, силикаты, металлы и сам углерод с размером частиц от значений менее микрона до нескольких сантиметров. Не известно, существует ли ядроподобная сердцевина; если она есть, ее состав, вероятно, может соответствовать веществу углистого хондрита первого типа. Инфракрасные исследования приводят к предположению, что кометная пыль поразительно сходна с веществом оболочек, окружающих звезды, богатые кислородом и углеродом, и с пылевым компонентом межзвездной среды. Присутствующие в этих областях пылевые частицы, возможно, порождаются звездами-гигантами, включая новые и сверхновые. К характерному значению распространенности изотопов углерода могут приводить различные механизмы. Наряду с отдельными источниками, цитируемыми ниже, см. обзор [5]. Отношения  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ <sup>1)</sup> для красных гигантов, звезд, богатых углеродом, и межзвездной среды лежат в интервалах от  $<10$  до  $>50$  [21, 27], от 2 до 100 [23] и от 13 до 105 [24] соответственно; в последнем случае, вероятно, наиболее характерно значение от 30 до 50 [26]. В зависимости от соотношения C/O пыль, образующаяся вокруг красных звезд, может представлять собой силикат, SiC или графит. В газовой фазе должны быть молекулы CO, H<sub>2</sub>O и C<sub>2</sub>. В конденсированной и газовой фазе может протекать существенное фракционирование изотопов, в особенности при протекании ионно-молекулярных реакций между CO и C [28], причем графит обогащается изотопом  $^{12}\text{C}$  [7]. Среди других соединений углерода, предложенных в качестве вещества межзвездных пылинок, можно отметить полиацетилен карбин [29]; данные по древним метеоритам свидетельствуют в пользу этого предположения [30].

Неоднократно предпринимались поиски земных остатков выпадающих кометных частиц и попытки сбора такого рода материала [2]. Вероятно, наибольшего внимания заслуживает мате-

<sup>1)</sup> Приводимые в статье изотопные отношения для углерода представлены в виде двух величин. Спектроскопические оценки даны в виде непосредственного отношения содержания изотопа  $^{12}\text{C}$  к содержанию  $^{13}\text{C}$ , т. е.  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ . Лабораторные масс-спектрометрические измерения даны в обычных единицах фракционирования  $\delta$  по отношению к стандарту PDB.

риал в виде мелких пылинок, собранных высоко в стратосфере с самолета «У-2» и названных в честь первооткрывателя «частицами Браунли». Измерения распространенности элементов [10] и содержания редких газов в частицах с определенностью указывают на их внеземное происхождение [12]. Медленно накапливающиеся тихоокеанские донные осадки [8, 20] с давних пор [17] служили источником материала предполагаемого косми-

Таблица 1

Характеристики предполагаемых кометных частиц,  
найденных на Земле

	Хондритный тип	Магнитный тип
Основной источник	Стратосфера	Тихоокеанские донные осадки — марганцевые конкреции
Распространенность	1 ( $\geq 10$ мкм) на $10^3$ м <sup>3</sup> воздуха на высоте 20 км	До 200 ( $\geq 100$ мкм) на 1 кг осадка; до 1000 ( $\geq 100$ мкм) на 1 кг марганцевых конкреций
Диапазон размеров	От $< 3$ мкм до $\sim 40$ мкм	Редко более 250 мкм
Морфология	Очень сложные агрегаты либо сферические сплавленные частицы	Весьма разнообразная (сферы, частицы неправильной формы, агрегаты, отдельные кристаллы, хлопья)
Характерный химический состав	Распространенность элементов, характерная для Солнца или хондритов, в пределах коэффициента 2; много C, <sup>4</sup> He	Fe, Ni, Co в отношениях, типичных для метеоритов; низкое содержание малораспространенных в космосе элементов (Mn, Cr, Ti); наличие серы, вюстита (FeO) — метастабильного окисла

ческого происхождения; сейчас доступны значительные количества этого материала, опять-таки благодаря усилиям Браунли и его сотрудников [3]. Известно также, что в осадках марганцевых конкреций сосредоточены магнитные зерна [9, 13, 16]. Предпринимались попытки обнаружить соответствующий материал в снегах и льдах Арктики и Антарктики.

В табл. 1 приведены основные характеристики предполагаемых кометных частиц, найденных на Земле. Исследования имеющегося в частицах углерода крайне ограничены: обычная методика измерения отношения стабильных изотопов углерода со-

вершенно неприменима из-за недостаточной чувствительности при работе с очень малыми доступными образцами. Браунли [2] на основе электронно-микроскопических исследований, допускающих ошибку до 100 %, предположил, что хондритные частицы могут содержать до 15 % углерода. После проведения анализа частицы часто бывали окружены гало, предположительно из-за конденсации углеродистого вещества, перешедшего

Таблица 2

## Углерод в составе метеоритов

Тип метеорита	Общее содержание С ( $\delta^{13}\text{C}$ )	Форма углерода (оценки $\delta^{13}\text{C}$ , если они существуют, приводятся в скобках)
Углистые хондриты	до 4,8% (от -5,6 до -10,3 ‰)	Экстрагируемое органическое вещество (от -5,3 до -27,2 ‰); полимерное вещество (от -14,8 до -17,1 ‰); захваченные газы; карбонаты (от +44,6 ‰ до +70,2 ‰); фазы редких газов, вероятно, более древние, чем Солнечная система, предварительно отождествленные как карбины (около -17 ‰)
Обычные хондриты	до 0,60% (от -25,8 до -30,2 ‰)	Слабо выражены: графит, аморфный углерод, углерод с металлическими фазами, фазы редких газов петрологического типа 3
Железные метеориты	до 0,05%	Графит (от -4,2 до 8,1 ‰), карбиды (от -18 до -19 ‰), углерод в виде твердого раствора в тэните (от -18,7 до -22 ‰) и камасите
Уреилиты	до 4,1% (от -7,1 до 8,4 ‰)	Алмаз (от -5,7 до -6,3 ‰), углерод с металлическими фазами, фазы редких газов

в летучее состояние [2]. В одном случае был обнаружен кальцитовый обломок размером 40 мкм [3]. Если принять, что некоторые из космических микрочастиц по составу аналогичны метеоритам, можно указать вероятные для них углеродистые фазы и их возможный изотопный состав (табл. 2).

При прохождении комет через внутреннюю область Солнечной системы льды переходят в летучее состояние и образуют облако пыли и расширяющегося газа, часть которого впоследствии ионизируется. Давление солнечного излучения вместе с движением кометы придает ему характерную и часто эффективную форму хвоста, состоящего из пыли и плазмы. Углеродсодержащие компоненты, наблюдавшиеся в газе с помощью спектроскопии в форме ионов или нейтральных молекул, включают окисленные и восстановленные соединения, цианиды, сульфиды и радикалы  $\text{C}_1 - \text{C}_3$  неизвестной природы. О природе молекул,

порождающих поддающиеся отождествлению соединения, можно только догадываться. Не все из возможных молекул, например аминокислоты, карбоновые кислоты и углеводороды, которые могли бы по аналогии с углистыми хондритами типа I присутствовать в составе комет, достаточно летучи для того, чтобы пребывать в газовой фазе; кроме того, возможно присутствие смолистых и полимерных соединений.

Единственно доступные нам непосредственные данные, касающиеся изотопного состава комет, получены при исследовании полос Свана, возникающих из-за присутствия неотождествленных соединений  $C_2$ . Измерения отношения  $^{12}C/^{13}C$  для комет Икейя, Таго — Сато — Косака, Беннета, Когоутека и Кобаяши — Бергера — Милона дают значения в интервале от  $\geq 50$  до 135 при типичном значении ошибки от  $\pm 15$  до  $\pm 60$  [5, 25, 26]. Среднее значение из шести определений (если такое число является статистически значимым) составляет около 96. Таким образом, может показаться, что изотопный состав углерода в кометном газе в целом эквивалентен составу других тел Солнечной системы (около  $89 \pm$  несколько процентов — подходящее значение для Земли, Солнца, Марса, метеоритов и т. д.), и на основании этого можно предположить, что кометы возникли в Солнечной системе. Однако совокупность имеющихся данных вряд ли придает уверенность в такой интерпретации.

### Определение изотопного состава углерода в веществе комет

Из предыдущего рассмотрения химии кометного углерода следует, что для осуществления изотопных измерений имеются три различные возможности: 1) получение данных о космической пыли предположительно кометного происхождения, не покидая лаборатории на Земле; 2) осуществление проектов космических экспедиций к кометам, несомненно позволяющее провести измерения в газовой фазе с помощью нейтрального масс-спектрометра, составляющего часть научного оборудования; 3) подобным же образом применение анализаторов, использующих соударения частиц, помогло бы решить более сложную проблему получения изотопных данных путем исследования образующейся при ударе плазмы. Вероятно, последний вид информации был бы наиболее полезным, поскольку он дает характеристику комет как целого. К сожалению, если только между кометным и земным отношениями изотопов не будет наблюдаться принципиальных различий, эксперименты третьего типа вряд ли внесут значительный вклад в изучение происхождения жизни из-за ограниченной точности измерений. Однако исследования, относящиеся к первой и второй группе, должны дать возможность получить более

точные данные, и даже если они не позволят сделать выбор между гипотезами происхождения комет в целом, появятся основания для дискуссий в биологическом контексте. Оставшиеся два раздела этой статьи будут посвящены усилиям и соображениям, связанным с исследованиями в указанных двух областях.

### Исследования космической пыли

Обычный способ определения содержания углерода и изотопных определений в геологических образцах заключается в их сожжении и последующих масс-спектрометрических измерениях полученного  $\text{CO}_2$ . Иногда перед сожжением газообразных продуктов применяется последовательный пиролиз образцов. Этот общий подход имеет два очень крупных недостатка, препятствующих изучению космических микрочастиц. Во-первых, применяемые сложные системы манипуляции с газами весьма затрудняют снижение фонового уровня до значений менее  $100 \cdot 10^{-9}$  г углерода. Даже если фоновый уровень будет существенно снижен, динамический масс-спектрометрический метод, применяемый для высокоточных изотопных исследований, требует минимальной массы образца около  $10^{-6}$  г углерода в виде  $\text{CO}_2$ .

В настоящее время мы разрабатываем другой подход, использующий статический масс-спектрометр для изучения углеродистых соединений. Детектирование с помощью электронного умножителя позволит достигнуть уровня чувствительности около  $10^{-14}$  г углерода. Метод основан на присущей дейтериюглероду  $\text{CD}_4$  стабильности в присутствии нити ионного источника и при очень низком уровне фона и помех в участке спектра, соответствующем массе 20 [11]. Использование масс 20 ( $^{12}\text{CD}_4$ ) и 21 ( $^{13}\text{CD}_4$ ) позволяет провести измерения отношения содержания стабильных изотопов. Исследование стандартных образцов на инструменте-прототипе с применением менее чувствительного, но более стабильного фарадеевского коллектора дает основания полагать, что при использовании испытываемого в настоящее время время двойного коллектора можно достигнуть точности выше  $1/1\,000\,000$  с образцами  $(1 \div 10) \cdot 10^{-9}$  г (Райт и др., неопубликованные данные).

Максимальный размер частиц Браунли составляет около 40 мкм. Предполагая содержание углерода от нескольких до десяти процентов и плотности от 1 до 3 г/см<sup>3</sup>, получим абсолютное содержание доступного для измерений углерода в этом материале в диапазоне  $(1 \div 10) \cdot 10^{-9}$  г, что в точности соответствует цели программы наших разработок. Космические пылинки из глубоководных морских осадков могут быть гораздо больше, но, если они состоят главным образом из металла, типичное содержание углерода может составлять 0,1—0,5 %. Таким обра-

зом, фрагменты размером 200 мкм будут иметь абсолютное содержание углерода до  $100 \cdot 10^{-9}$  г, что значительно превосходит наши минимальные требования.

Предварительное условие применения статического масс-спектрометрического метода состоит в том, что образцы углерода должны быть целиком превращены в  $CD_4$  без изотопного фракционирования (или с вполне определенным и воспроизводимым фракционированием) и без серьезных загрязнений. Мы нашли такую реакцию и построили вакуумную систему, в которой можно провести конверсию газовой фазы  $CO_2$  в  $CD_4$ , используя  $D_2$  и никелевый катализатор (предварительные результаты см. в [1]). После удаления избытка дейтерия в поглотителе  $Zr/Al$  остается дейтерометан с содержанием более чем 98 атомных процентов. Тщательная отработка деталей привела к понижению уровня загрязнения в системе обработки газа примерно до  $(1 \div 2) \cdot 10^{-10}$  г углерода даже при том, что для лучшего дейтерирования необходима температура  $400^\circ C$ . Реакция имеет кинетический изотопный эффект, однако его можно избежать, если предоставить достаточно времени (около 10 мин) для ее завершения. Результаты повторных опытов со стандартными образцами малого размера ( $3 \cdot 10^{-9}$  г углерода) согласуются с точностью  $\pm 1,6/1\,000\,000$ . Полное описание деталей эксперимента и оценка изотопных характеристик реакции будут опубликованы позже.

Прежде чем методику статической масс-спектрометрии можно будет применить к частицам космической пыли, потребуются существенные улучшения холостых опытов, связанных с сожжением образцов. В настоящее время изучается ряд возможных способов достижения этой цели.

### Фронтальный изотопный реактор, применяемый в исследовании комет (CIFER)

На аппаратах, предназначенных для исследования планетных атмосфер, измерения изотопного состава углерода и азота обычно проводятся с использованием развертки масс-спектра  $m/e$  в области  $m/e = 28, 29$ , а также 44, 45 и 46 [18]. При исследовании комет такой подход, возможно, окажется менее эффективным, поскольку образцы газа могут быть более сложными из-за присутствия углеводородов, цианида или даже сульфидов. Изотопный состав кислорода любой внеземной системы может отличаться от земного [6], а изотопные измерения азота в материале внеземного происхождения дают весьма широкий диапазон значений [14, 15].

Постулируя ожидаемый масс-спектр газовой фазы кометы, мы приходим к множеству возможных изотопных смесей интере-

сующих нас ионов в области  $m/e = 28$  и  $m/e = 44$  (табл. 3). Восстановление CO и CO<sub>2</sub> до CD<sub>4</sub> могло бы перенести изотопы углерода, присущие основным составляющим вещества кометы, в сравнительно чистый участок спектра. При условии что содержание <sup>20</sup>Ne<sup>+</sup> и <sup>21</sup>Ne<sup>+</sup> мало, а содержание <sup>40</sup>Ar<sup>++</sup> также мало или может быть уменьшено за счет работы при пониженной энергии электронов, можно будет без существенной помехи провести измерения <sup>12</sup>CD<sub>4</sub> и <sup>13</sup>CD<sub>4</sub>, полученных из окисленных форм углерода, и, следовательно, изотопное отношение будет определено с лучшей точностью.

Таблица 3

Изотопы, встречающиеся в атмосферах комет

Область масс	Соединения <sup>1)</sup>
28	<sup>12</sup> CO, <sup>14</sup> N <sub>2</sub> , <sup>12</sup> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (H <sup>13</sup> CN, HC <sup>15</sup> N)
29	<sup>13</sup> CO, <sup>15</sup> N <sub>2</sub> , <sup>13</sup> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
44	<sup>12</sup> CO <sub>2</sub> , <sup>12</sup> C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , <sup>12</sup> CS
45	<sup>13</sup> CO <sub>2</sub> , <sup>13</sup> C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , <sup>13</sup> CS, <sup>12</sup> C <sup>33</sup> S
20	<sup>20</sup> Ne, <sup>40</sup> Ar <sup>++</sup>
21	<sup>21</sup> Ne

<sup>1)</sup> Исключая дейтерированные производные.

Каталитическое восстановление CO<sub>2</sub> в CD<sub>4</sub> с использованием никеля и дейтерия является неотъемлемой частью нашего метода стабильных изотопов; таким образом, уже имеется основа для осуществления соответствующего процесса на борту космического аппарата. Как показала успешная работа заборного устройства атмосферных проб, установленного на масс-спектрометре станции «Викинг» [22], существует принципиальная возможность различных манипуляций с газами и осуществления реакций в газовой фазе на космических аппаратах. В некоторых экспериментах заборное устройство могло концентрировать редкие газы путем химического поглощения CO<sub>2</sub>, CO и воды [19]. Значительная часть оборудования, использованного на станции «Викинг», могла бы найти применение для CIFER при условии, что используемые конструкционные материалы будут совместимы с требованием низкого фона.

Одна из проблем, требующих тщательного изучения, заключается в том, какое количество H<sub>2</sub> и (или) H<sub>2</sub>O (вероятно, присутствующих в веществе кометы), не будет наносить ущерба измерениям. Наличие протонов привело бы к появлению соеди-

нений типа  $^{12}\text{CD}_3\text{H}$  и  $^{13}\text{CD}_3\text{H}$ , которые вносят помехи в измерения  $^{12}\text{CD}_4$ . Образование таких соединений может также привести к фракционированию изотопов углерода. При необходимости воду можно удалить химическим путем; достаточно высокое давление дейтерия будет способствовать тому, что кометный водород потонет в его избытке. Образующаяся CIFER тяжелая вода  $\text{D}_2\text{O}$  поглощается в ходе удаления избытка  $\text{D}_2$ .

При проведении восстановления с помощью CIFER в ходе космического полета понадобится тщательный расчет времени, и, вероятно, продолжительный контакт с объектом будет предпочтительнее быстрого пролета. Мы предложили бы сначала получить данные обычным путем, а исследования после восстановления провести на последующих этапах полета. Таким образом можно будет получить определенные изотопные данные по неону. Кроме того, если масс-спектрометр ранее не подвергался контакту с дейтерием, снимается угроза измерениям отношения  $\text{D}/\text{H}$  в первичном газе комы. Количественные определения в диапазоне масс 28 и 44, проводимые после применения CIFER, обеспечат данные по углеводородам, включающим  $\text{C}_2$  и  $\text{C}_3$ , поскольку поглотитель, используемый для удаления избытка дейтерия, удаляет также и азот. Имея в своем распоряжении изотопные данные по окисленному и восстановленному углероду, можно достичь гораздо лучшей оценки отношения  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  путем интерполяции области  $m/e = 28$  спектров, полученных до применения CIFER. Аналогично распространенность изотопов кислорода можно будет оценить, сравнивая области  $m/e = 44, 45$  и  $46$  до и после обработки.

## Обсуждение результатов

Кометы — наиболее фундаментальные среди еще не исследованных объектов Солнечной системы. Действительно, изучая их, мы, может быть, сумеем заглянуть за ее пределы. В 80-е годы, когда уже получили одобрение проект «Джотто» Европейского космического агентства и другие программы изучения кометы Галлея, наземные и космические исследования в этой области получили должную поддержку. Специалисты обращаются к многим принципиальным вопросам, включая и вопрос о роли комет в происхождении жизни на Земле. По нашим ожиданиям, высокочувствительные и высокоточные измерения стабильных изотопов займут важное место в решении этих проблем.

Чтобы связать проблему происхождения жизни с космосом, необходимо будет выяснить соотношение между углеродистым веществом комет и углеродистым веществом докембрийских осадочных пород, которые рассматриваются большинством исследователей как древнейшие носители следов жизни на Земле.

Весьма вероятно, что специфический характер изотопных данных даст специалистам ключ к решению проблемы. Изучение кометных частиц на Земле и докембрийских отложений потребует высочайшей чувствительности. Мы собираемся применить метод статической масс-спектрометрии изотопов к образцам материала обоих видов.

Точные измерения стабильных изотопов легких элементов следует провести также в кометах *in situ* для того, чтобы проверить, действительно ли они являются источником такого рода микрочастиц, находимых на Земле. Отсутствие удовлетворительных способов отождествления линий в сложных масс-спектрах, несомненно, понизит надежность данных, получаемых при анализе газовой фазы проб кометного вещества. Мы уже отмечали, насколько широк тот диапазон отношений изотопов углерода, с которыми придется столкнуться; можно ожидать наличия окисленных и восстановленных форм. Изотопный состав азота и кислорода также может испытывать значительные колебания даже в пределах Солнечной системы. Возможность перевести окисленный углерод в «чистую» область спектра с помощью реакции восстановления дейтерием означает, что доступны уникальные измерения этого компонента кометного вещества. Условия реакции, применяемой в CIFER, позволят осуществить точные измерения с некоторыми видами восстановленных соединений. Более совершенные данные об изотопах углерода могли бы улучшить также и оценки изотопных отношений азота и кислорода.

Авторы приносят благодарность Совету по научным исследованиям и Совету по исследованиям окружающей среды Великобритании за финансовую поддержку, а также выражают признательность фонду Наффилда за содействие.

## Литература

1. Abell P. I., Fallick A. E., Pillinger C. T. *Advances in Organic Geochemistry*, in press, 1980.
2. Brownlee D. E. In: *Cosmic Dust*, ed. by J. A. M. McDonnell, J. Wiley and Sons, Chichester, 1978.
3. Brownlee D. E. Papers presented at 42nd. Annual Meeting of the Meteoritical Society, Heidelberg, Germany, September, 1979.
4. Brownlee D. E., Pilachowski L. B., Hodge P. W. *Lunar and Plan. Science X*, Lunar and Planetary Institute, Houston, 157—158, 1979.
5. Chang S. NASA Conference Publication 2089, 59—111, 1977.
6. Clayton R. N. In: *Origin and Distribution of the Elements*, vol. 11, ed. L. H. Ahrens, Pergamon Press, Oxford, 1979.
7. Field G. B. NASA Conference Publication 2089, 113—137, 1977.
8. Finkelman R. B. *Science*, **167**, 982—984, 1970.
9. Finkelman R. B. *J. Mar. Tech. Soc.*, **6**, 34—39, 1972.
10. Ganapathy R., Brownlee D. E. *Science*, **206**, 1075—1077, 1979.
11. Gardiner L. R., Pillinger C. T. *Anal. Chem.*, **51**, 1230—1236, 1979.

12. Hudson B., Flynn G. J., Fraundorf P., Honenberg C. M., Schrick J. Lunar and Planetary Science XI, Lunar and Planetary Institute, Houston, 492—494, 1980.
13. Jedwab J. Meteoritics, 10, 191—207, 1975.
14. Kerridge J. F., Kaplan I. R., Lingenfelter R. E., Boynton W. V. 8th Lunar Sci. Conf., 3773—3789, 1977.
15. Kung C.-C., Clayton R. N. Earth Planet. Sci. Lett., 38, 421—435, 1978.
16. Millard H. T., Finkelman R. B. J. Geophys. Res., 75, 2125—2134, 1970.
17. Murray J., Lenard A. F. Challenger Report for 1872—1876, H. M. Stationery Office, 1891.
18. Nier A. O., McElroy M. B. J. Geophys. Res., 82, 4341—4349, 1977.
19. Owen T., Biemann K., Rushneck D. R., Billere J. E., Howarth D. W., LaFleur A. L. Science, 194, 1293—1295, 1976.
20. Parkin D. W., Tilles D. Science, 159, 936, 1968.
21. Reimers D. Astron. Astrophys., 52, 457—459, 1976.
22. Rushneck D. R., Diaz A. V. et al. Rev. Sci. Instrum., 49, 817—834, 1978.
23. Scalo J. Astrophys. J., 215, 194—199, 1977.
24. Townes C. H. Observatory, 97, 52—53, 1977.
25. Vanisek V. In: Comets, Asteroids and Meteorites, ed. A. H. Delsemme, University of Toledo, USA, 499, 1977.
26. Vanisek V., Rahe J. Moon and Planets, 18, 441—446, 1978.
27. Vigroux L., Audouze J., Lequeux J. Astron. Astrophys., 52, 1—9, 1976.
28. Watson W. D., Anticich V. G., Huntress W. T. Astrophysical J., 205, 165—168, 1976.
29. Webster A. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 192, 7, 1980.
30. Whittaker A. G., Watts E. J., Lewis R. S., Anders E. Science, 209, 1512—1514, 1980.
31. Wright I. P., Fallick A. E., McNaughton N. J., Pillinger C. T. Неопубликованные данные.

# Существует ли связь между кометами и происхождением жизни?

А. Дельземм<sup>1)</sup>

Имеющиеся данные, по-видимому, указывают на то, что кометы образовались во время формирования Солнечной системы, и с тех пор они сохраняются в своем первоначальном состоянии, находясь в условиях низких температур космического пространства. Распространенности элементов в летучей фракции комет, видимо, очень близки к космическим распространенностям, за исключением водорода, количество которого уменьшено в 1000 раз. По этой причине окислительно-восстановительное соотношение для комет, вероятно, составляет примерно  $H/O = 1,8$ . По-видимому, это приближенное значение представляет наиболее достоверную характеристику их химического состава, который все еще следует считать весьма неопределенным. Спектроскопия выявляет только те молекулярные фрагменты, которые постоянно покидают кометную экзосферу со скоростью, близкой к скорости звука, после диссоциации неопределенных «родительских» молекул и хаотической реассоциации при реакциях с обменом заряда в небольшой «зоне соударений» (от  $10^3$  до  $10^4$  км), окружающей крохотное ядро (от 1 до 10 км). Сравнение с данными по межзвездным молекулам приводит к предположению, что между межзвездным «инеем» и кометным «снегом» существует крайне тесная связь, а может быть, и идентичность. Хотя происхождение Солнечной системы далеко не ясно, вероятные сценарии этого процесса показывают связь между межзвездными частицами инея и кометами. Изотопные аномалии  $^{26}Al$  в хондрите Альенде позволяют сделать вывод, что примерно 4,5 млрд. лет тому назад  $^{26}Al$ , возможно, служил источником тепла в ядрах комет. Этот тепловой источник мог привести к образованию в ядрах комет резервуара циркулирующей воды размером 0,1—1,0 км на срок 10—100 млн. лет. Однако все косвенные свидетельства, полученные на основе данных наблюдений, говорят против возможности какой-либо дифференциации комет. Что касается проблемы возникновения жизни, отметим, что кометные молекулы близки к тем, которые необходимы для предбиологической эволюции; они могут даже содержать аминокислоты, пурины и пиримидины, некоторая доля ранней атмосферы

<sup>1)</sup> Факультет физики и астрономии, Университет Толедо, Толедо, шт. Огайо 43606, США.

также может быть отнесена на счет ранней кометной бомбардировки, связанной с конечными стадиями аккреции планет-гигантов. Однако отсутствие дифференциации, а следовательно, и жидкой воды в настоящее время не делает кометы особенно привлекательными для развития гипотез, переносящих происхождение жизни в космос, по крайней мере на данной ступени нашего невежества в этом вопросе.

## Введение

В этой статье предполагается обсудить вероятную взаимосвязь между кометами и возникновением жизни на Земле. Для этого сначала мы рассмотрим орбитальную эволюцию комет и их связь с образованием Солнечной системы. Далее будет обсуждаться химия комет и проведено сравнение с межзвездными молекулами и биосферой Земли.

### 1. Орбитальная эволюция и происхождение комет

До настоящего времени исследованы кометные орбиты менее чем 700 различных комет — около 600 периодических и 100 «новых» комет. Периодические кометы — это недолговечные объекты, распадающиеся в короткие сроки по сравнению с возрастом Солнечной системы. Их происхождение обычно приписывается постоянному притоку «новых» комет, захватываемых совместным воздействием Юпитера и Сатурна [6].

Откуда берутся «новые» кометы? Их афелии расположены примерно в одном и том же диапазоне расстояний, а именно около  $50\,000 \pm 10\,000$  а. е. Кроме того, их распределение по энергиям связи достаточно узкое и острое. Поэтому можно утверждать, что с точки зрения статистики они никогда ранее не испытывали возмущений со стороны Юпитера и Сатурна; мы наблюдаем их во время самого первого прохождения через планетную систему. На основании этого факта Оорт [21] выдвинул предположение о существовании связанного с Солнечной системой большого облака, включающего примерно  $10^{11}$  ненаблюдаемых комет, край которого (около 50 000 а. е.) постоянно испытывает возмущения при прохождении соседних звезд. Тем самым устанавливается наблюдаемый темп внедрения «новых» комет внутрь планетной системы.

Однако, если существование так называемого кометного облака Оорта уже не подвергается особым сомнениям, доказательств, вынуждающих признать, что его возраст совпадает с возрастом Солнечной системы, не имеется [8].

Особые надежды возлагались на то, что наблюдаемое изотопное соотношение углерода в кометах прольет свет на их

возраст. Принципиальная основа этого метода такова: земное соотношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$  относится ко времени отделения вещества Солнечной системы от галактического газа и пыли, а поскольку в недрах звезд, более молодых, чем Солнце, протекает процесс переработки элементов, цикл  $\text{C} - \text{N} - \text{O}$  должен постоянно снижать среднегалактическое значение отношения  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  [3].

Наблюдаемое соотношение, ныне существующее у межзвездных молекул ( $40 \pm 20$ ), на первый взгляд подтверждает эту теорию. К сожалению, реакции, уравнивающие изотопный состав различных видов молекул, наблюдаемых в космосе, вполне согласуются с современным соотношением изотопов в Галактике, столь же высоким, как и для Солнечной системы. Поэтому тот факт, что отношение изотопов для комет ( $100 \pm 30$ ), хотя и не вполне надежное, остается в пределах того же порядка, что и земное соотношение, не может служить основой каких-либо заключений о возрасте комет.

Поскольку никакого окончательного вывода сделать нельзя, время от времени следует вновь рассматривать возможность того, что кометы могут быть моложе Солнечной системы и по своему происхождению никак не связаны с ее образованием. Некоторые из недавних гипотез вполне оправдывают затраченные на их разработку усилия, однако они пока не в состоянии конкурировать с все более распространенным мнением о справедливости гипотезы, согласно которой происхождение комет связано с возникновением Солнечной системы.

Чтобы не вносить путаницу в изложение, я приведу описание только этой гипотезы. Тот факт, что все кометы гравитационно связаны с Солнцем, в ее рамках представляется естественным следствием их происхождения и не требует дополнительных объяснений.

Однако, чтобы объяснить заполнение сферы радиусом 50 000 а. е., окружающей Солнце, вообще говоря, необходимо принять некоторый механизм рассеяния на ранних стадиях эволюции Солнечной системы. Поэтому вначале следует описать картину образования Солнечной системы. Детали этой картины и альтернативные идеи можно найти в недавно вышедших книгах [11, 13] или обзоре [26].

## 2. Современная картина образования Солнечной системы

В табл. 1 представлена (с некоторыми вариантами) картина образования Солнечной системы, опирающаяся, по всей видимости, на более или менее устоявшиеся представления. До сих пор ни одна численная модель не позволяет успешно объ-

яснить все стадии от сжатия межзвездного облака до деталей процесса аккреции планет, но отдельные этапы общей последовательности событий описываются частными моделями, подчеркивающими те или иные процессы. Споры по поводу роли различных процессов возникают в основном из-за неопределенностей, принятых в моделях характерных времен, влекущих за собой неопределенности в отношении возможных совпадений различных событий во времени и в хронологии поворотных пунктов. Ниже приводятся некоторые примеры такого рода неопределенностей.

Таблица 1

## Образование Солнечной системы

1. *Сжатие межзвездного облака* ( $10^8$  лет?)  
(Запуск: Прохождение через волну плотности? Сверхновая?)
2. *Охлаждение облака* (после уплотнения) до 20 К  
(намерзание межзвездных молекул на пылевых частицах)
3. *Сжатие под действием самогравитации* ( $10^7$  лет?)  
— в одну (уплощенную вследствие вращения) протосолнечную туманность?  
— в рой протозвездных туманностей?
4. *Возникновение гравитационных неустойчивостей* в газе нашей протосолнечной туманности  
— одной (Солнце) или трех (Солнце, Юпитер и Сатурн)?  
— большего числа, в дальнейшем разрушенных солнечными приливами? (меньшие радиусы  $r$ )  
— большего числа, утраченных позже в форме «убегающих» звезд? (большие радиусы  $r$ )
5. *Сильный разогрев* пылевых частиц в протосолнечной туманности; температурный градиент; пылевые частицы теряют намерзший слой при  $r < 4$  а. е.
6. *Турбулентное движение в туманности прекращается*, как только протосолнце достигло значения своей окончательной массы
7. *Осаждение пылевых частиц в виде экваториальных колец* вокруг протосолнца (а также вокруг Юпитера и Сатурна?)
8. *Быстрое сжатие пылевых частиц* вследствие гравитационных неустойчивостей в каменные планетезимали или кометезимали из льда (1—10 км в диаметре)  
— иначе, медленная аккреция за счет слипания.
9. *Если Юпитер и Сатурн* не образовались, как указано в п. 4, содержание Н и Не требует сжатия газа вокруг каменных зародышевых тел.
10. *Рассеяние остатков газа туманности*, выносимых в ходе стадии Т Тельца для протосолнца (Накопление комет в облаке Оорта?)
11. *Медленный захват* мелких объектов более крупными, приводящий к аккреции планет (земного типа:  $10^7$ — $10^8$  лет; Уран — Нептун:  $10^9$  лет).
12. *Рассеяние планетезималей* зародышами планет: увеличивает эксцентриситеты орбит и объединяет вклады различных гелиоцентрических расстояний в ходе конечных стадий аккреции, в частности:
  - а) начальное выпадение на планеты земного типа кометного вещества, поступающего из зоны орбит Юпитера и Сатурна.
  - б) незначительное (1%) более позднее выпадение кометного вещества на планеты земного типа при медленной аккреции Урана и Нептуна.
  - в) частичная утрата и частичное накопление материала в облаке Оорта.

### а) Время, затрачиваемое на сжатие

Характерное время сжатия облака по крайней мере так же велико, как и время свободного падения (типичное значение для одной солнечной массы составляет 2 млн. лет при расстоянии 50 000 а. е. и 10 млн. лет — при 150 000 а. е.), но этот процесс может замедляться из-за торможения, вызванного раскручиванием галактических магнитных силовых линий; диффузия магнитного поля зависит от неопределенной степени ионизации облака.

### б) Масса исходной туманности

Другая проблема связана с размерами и массой исходной туманности, подвергающейся сжатию. Конечно, большая масса облака заставляет его сжиматься быстрее; этот фактор, видимо, благоприятствует образованию звездных ассоциаций, подобных наблюдаемой в Орионе. Поэтому нет ничего невероятного в том, что множество гравитационных неустойчивостей породили такое количество звезд, которые за  $10^7$  лет в итоге оказались рассеянными в разные стороны.

### в) Образование Юпитера и Сатурна

Наличие очень больших количеств водорода и гелия на Юпитере и Сатурне свидетельствует о вероятности образования этих двух самых больших планет Солнечной системы также в *ранний* период ее эволюции при гравитационном сжатии газовой туманности, т. е. одновременно с образованием Солнца и других возможных звездных компонентов, впоследствии утраченных в ходе рассеяния этой гипотетической звездной ассоциации.

Из сказанного также следует вывод, что Юпитер и Сатурн в ранний период эволюции уже вышли на устойчивые квазикруговые орбиты; другие планеты указанного типа, находящиеся на таком же расстоянии, очевидно, могли быть «потеряны» при резонансных возмущениях в системе трех тел. Расположенные ближе к Солнцу, они должны были бы разрушиться еще в ранний период эволюции вследствие приливных неустойчивостей, как только масса Солнца стала достаточно велика.

### г) Вспышка сверхновой

Вспышка сверхновой, следы которой сохранились в виде аномального содержания  $^{26}\text{Mg}$  в двух хондрах хондрита Альенде, вероятно, произошла в одной из очень массивных (т. е. быстро эволюционирующих) звезд этой звездной ассоциации. По-

скольку отмеченная аномалия сохранялась в форме  $^{26}\text{Al}$  до момента образования хондрита, эти два события должны быть разделены несколькими миллионами лет (период полураспада  $^{26}\text{Al}$  составляет 0,7 млн. лет).

#### д) *Пылевые кольца*

Вероятно, наиболее важной особенностью этих моделей, отличающей их от описания солнечной туманности Лапласом, является быстрое осаждение пыли с образованием экваториальных колец. Однако, если пыль начинает оседать до рассеяния газа туманности, турбулентность газа замедляет или приостанавливает процесс осаждения, по крайней мере для более мелких пылевых частиц. Только когда турбулентность газа была подавлена, т. е. после того, как Солнце достигло своей окончательной массы, осаждение пыли прошло в очень короткие сроки. Высокая температура газа могла задержать осаждение пыли в случае планет земной группы, что дало возможность зародышам гигантских планет сформироваться первыми.

#### е) *Образование планетезималей*

Для очень быстрого образования планетезималей из мелких пылевых частиц в пылевых кольцах должны были появиться гравитационные неустойчивости. Это возможно *лишь* при больших локальных плотностях пыли, т. е. в результате осаждения должны были образоваться удивительно тонкие кольца. В противном случае образование планетезималей должно было происходить за счет медленного процесса слипания пылевых частиц и потребовало бы гораздо больше времени.

#### ж) *Рассеяние остатков газа*

Необыкновенно сильное обеднение земной атмосферы первичными инертными газами обычно приписывают равномерной потере  $10^{-7}$  от общего количества оставшегося в туманности газа, наступившей прежде, чем произошла какая-либо селективная их потеря, например посредством гравитационного разделения при утечке из экзосферы [24]. Недавние дискуссии в связи с селективным разделением по массе (адсорбция, диффузия, равновесие по растворимости или утечка из планетезималей малого радиуса с малой силой тяготения), вероятно, не имеют отношения к фундаментальной равномерной потере  $10^{-7}$  общей массы газа, которая, видимо, связана с рассеянием солнечной туманности на ранних стадиях эволюции, до того как Земля путем аккреции приобрела свои современные массу и размер.

Такое рассеяние газообразных остатков туманности обычно приписывают сильному солнечному ветру, возникшему в ходе ранней фазы повышенной светимости Солнца (фаза Т. Тельца). Судя по скоростям потери массы, найденным для звезд типа Т Тельца, это весьма интенсивный и быстрый процесс ( $10^7$  —  $10^8$  лет [15]), но когда он начался, мы точно не знаем.

Если это произошло до завершения оседания пылевых частиц, с образованием плоских колец, то оседать могли только крупные пылевые частицы, а мелкие уносились вместе с газом туманности.

Однако этот процесс, вероятно, должен был полностью завершиться уже к моменту консолидации планетезималей в твердые объекты, и наверняка прежде, чем наступили завершающие стадии аккумуляции планет (уточнение деталей этого процесса может быть связано с выяснением причин селективной потери инертных газов метеоритами и атмосферой, и загадочно высокого содержания  $^{36}\text{Ar}$  на Венере).

### 3. Происхождение биосферы

Рассеяние планетезималей зародышами планет постепенно увеличивало эксцентриситеты их орбит и в ходе завершающих стадий аккреции планет привело к объединению вкладов планетезималей со все возрастающим диапазоном гелиоцентрических расстояний.

Верхний предел завершающей стадии аккреции планет земного типа устанавливается хронологией кратерообразования на Луне. Вероятно, его интенсивная фаза была близка к завершению через 600 млн. лет, а заключительная фаза — через 1500 млн. лет после начала процесса. Эти значения определяют и масштабы времени аккреции Урана и Нептуна, самой длительной в истории Солнечной системы (хотя бы из-за величины их периодов обращения). Простая экстраполяция позволяет сделать вывод, что для завершения на 90 % аккреции Земли из каменных планетезималей, находящихся на расстоянии нескольких астрономических единиц от Солнца, потребовалось около 30 млн. лет, а аккреция на 99 % — из каменных планетезималей и состоящих из льда кометезималей с расстояний до 10 а. е. — заняла 100 млн. лет, причем в заключительной стадии происходило выпадение вещества из зоны орбит Урана и Нептуна. Значения скоростей, выведенные на основе следов, оставленных на поверхности Луны более поздней бомбардировкой, действительно позволяют заключить, что кометы, приходившие с расстояний Урана и Нептуна, привнесли не более 1 % вещества земной биосферы. Однако, хотя большая часть следов бомбардировки Луны в первые 100 млн лет не сохранилась,

экстраполяция для случая Земли показывает, что ее интенсивность вполне может соответствовать общему количеству воды и летучих веществ, находящихся в нашей биосфере. Мысль о том, что весомая часть летучих веществ на Земле могла иметь кометное происхождение, часто упоминалась в прошлом [25, 27] и никогда не получала ни должного развития, ни должного опровержения. Следует иметь в виду тот важный аргумент, что ранние зародыши планет земного типа могли вести начало от претерпевших дегазацию планетезималей, состоящих из термостойкой пыли, как это можно предположить на основе обеднения нашей атмосферы редкими газами [24]. Однако из-за рассеяния планетезималей внешняя оболочка Земли могла полностью сложиться из «отделочного материала», включающего большое количество летучих, начиная с хондритов класса CV и кончая кометами. В этом может заключаться объяснение происхождения квазихондритов силикатной коры толщиной 1 км, слоя жидкой воды в 3 км и атмосферы из CO и CO<sub>2</sub> с давлением на поверхности 60 атм (см. раздел, посвященный химии комет).

Итак, этот механизм мог обеспечить поступление значительной доли углерода, находящегося ныне в биосфере. Поскольку ранние идеи о существовании высоковосстановительной первичной атмосферы подвергаются все большему сомнению со стороны геологов, существенно отметить, что указанный механизм обеспечивает создание атмосферы, имеющей окислительно-восстановительное соотношение Н/О порядка 2, в основном потому, что 3/4 имеющегося кислорода находится уже в связанном виде в форме воды, а несвязанный водород вовсе отсутствует. В точности такая ситуация следует из окислительного состояния вулканических газов ( $p\text{H}_2/p\text{H}_2\text{O} < 0,01$ ).

#### 4. Происхождение облака Оорта

В табл. 2 перечислены возможные источники комет в рамках обрисованной выше картины эволюции Солнечной системы. Процесс, описанный Сафроновым [23], является неизбежным следствием медленной аккреции планет (существование которой вытекает из данных по лунному кратерообразованию). Соотношение общей массы, подвергшейся аккреции гигантскими планетами, и выброшенной массы должно быть постоянным. Отсюда следует, что количество выброшенных кометезималей составляет около 300 земных масс, из которых три земные массы в итоге накопились в облаке Оорта. Эффективность этого процесса возрастает при учете встреч на удаленных расстояниях и нимать буквально.

В противоположность процессу Сафронова процесс Кameron (1972—1978) не является неизбежным, поскольку он су-

щественно опирается на наличие туманности неопределенной массы, простирающейся на расстояние более 1000 а.е. Обычно отмечают, что эффективность процесса Камерона выше, чем процесса Сафронова. Это в действительности так, если протокометное кольцо располагается в стратегически выгодной позиции (поскольку отправная точка отвечает более низкой энергии связи), но если общая эффективность определяется на ос-

Таблица 2

### Возникновение облака Оорта

1. Рассеяние планетезималей зародышами гигантских планет как неизбежное следствие их аккреции (Сафронов [23])
  - а) часть планетезималей (300 земных масс) теряется, переходя на гиперболические орбиты (из них около трех земных масс сначала проходит через *внутреннюю часть* Солнечной системы)
  - б) другая часть, составляющая около трех земных масс, накапливается в облаке Оорта
2. Весьма массивная туманность простирается на расстояние более  $10^3$  а. е. (Камерон, 1972—1978). Поскольку значительная масса должна быть утрачена, существует радиус  $r_0$ , внутри которого будет утрачена ровно половина всей массы. Если там существует кольцо планетезималей, то
  - а) часть, находящаяся на расстоянии больше  $r_0$ , теряется, переходя на гиперболические орбиты;
  - б) часть, находящаяся между  $r_0 - \varepsilon$  и  $r_0 - \Delta r$ , накапливается в облаке Оорта

нове *общей* потери массы на гиперболических орбитах и за пределами критического радиуса расположена большая масса, эффективность процесса Камерона может быть гораздо ниже, чем процесса Сафронова.

Для определения вклада каждого из процессов его эффективность все равно не имеет значения, поскольку в модели солнечной туманности, принадлежащей Камерону, предполагается гораздо большая масса. Преобладающий процесс в конечном счете будет определяться реальным распределением массы на периферии туманности. На данной стадии ясно, что каждый из процессов может внести свой вклад.

### 5. Являются ли кометы недифференцированными телами?

Пока у нас нет никакой непосредственной информации о структуре ядра какой-либо кометы. Однако все косвенные данные заставляют предположить, что кометные ядра являются недифференцированными. Действительно, на этом коллоквиуме различные авторы уже приводили ряд аргументов против возможности дифференциации. Уинпл рассмотрел диаграмму Се-

канины, которая показывает, что негравитационные силы линейно изменяются с изменением обратной величины параметра «прочности». Донн отметил, что при старении комет не проявляются какие-либо эволюционные изменения. А'Херн упомянул, что в ходе распада их состав остается однородным. Мендис нашел, что кажущиеся изменения, подобные изменениям отношения  $CO^+/CN$ , могут быть вызваны внешними причинами, например простым различием в размерах двух комет, приводящим к большому различиям в степени ионизации их солнечным ветром. Конечно, при распаде внешних слоев ядра теряется больше летучего материала, чем пыли; иногда крупные пылевые зерна могут образовывать «мантию» из пыли, претерпевшей дегазацию. Однако рано или поздно достигается стационарное состояние: обычно на малых гелиоцентрических расстояниях такая мантия «сдувается» и после прохождения перигелия высвобождается исходный материал кометы [18]. Поэтому возможная дифференциация комет, по-видимому, ограничена тонкой наружной «мантией», появляющейся либо вследствие распада их вещества под действием солнечного нагрева, если речь идет о периодических кометах, либо из-за облучения космическими лучами в период пребывания в облаке Оорта, если речь идет о «новых» кометах.

Несмотря на эти косвенные данные, которые, надо признать, все еще весьма непрочны, недавно вошло в моду рассматривать модели ранней дифференциации кометного ядра вследствие радиоактивности присутствовавшего там и ныне распавшегося  $^{26}Al$ . Справедливо, что открытие изотопных аномалий  $^{26}Mg$  в хондрах углистого хондрита Альенде может повлечь за собой далеко идущие последствия, поскольку оно позволяет предположить механизм быстрого нагревания (период полураспада  $^{26}Al$  равен 0,7 млн. лет), вызывающего дифференциацию небольших тел; роль такого механизма особенно велика, если аккреция слишком медленна для достаточно быстрого нагрева, вызывающего дифференциацию тел большего размера. Однако остаются многочисленные вопросы. Например, на какую часть Солнечной системы можно экстраполировать изотопные аномалии нескольких крохотных хондр, найденных в одном-единственном метеорите? Достаточно ли быстро протекает аккреция кометных ядер (в крайнем случае несколько миллионов лет), чтобы захватить необходимое количество  $^{26}Al$ , прежде чем он распадется? Возможность таких быстротекущих процессов согласуется с нашим сценарием эволюции Солнечной системы, если только кометы действительно представляют собой планетезимали, которые образовались вследствие гравитационных неустойчивостей в плоских кольцах, состоящих из частиц инея. Однако тогда следует вывод, что вспышка сверхновой, которая

могла запустить ранние стадии сжатия межзвездного облака, и сверхновой, вызвавшей образование  $^{26}\text{Al}$ , — это *не одно и то же* событие (см. табл. 1 и временные масштабы в табл. 3). Сверх-

Таблица 3

Типичные временные масштабы событий при образовании Солнечной системы

	Начало, млрд. лет тому назад	Продолжительность, млн. лет
Сжатие и охлаждение межзвездного облака	4,80	100—200
Сжатие темного облака в солнечную туманность, уплотненную вследствие вращения	4,70	10—100
Возникновение протосолнца	4,60	10 (выход на главную последовательность)
Прекращение турбулентных движений в туманности	4,59	10
Рассеяние газа туманности	4,58	10 (солнечный ветер в фазе Т Тельца)
Осаждение пыли в плоское кольцо	4,57	1
Сжатие пылевого кольца в планетезимали размером 1—10 км	4,56	(выраженный изохронизм метеоритов)
Аккреция планет земного типа	4,55	от 10 до 100
Аккреция планет-гигантов	4,55	от 100 до 1500 (по данным лунной бомбардировки)
Завершение поздней стадии бомбардировки	3,00	

новая, послужившая источником  $^{26}\text{Al}$ , должна быть одной из массивных звезд, образовавшихся почти одновременно с Солнцем в ходе сжатия более крупного облака. При таких допущениях я готов выдвинуть модель дифференциации ядер, приводя аргументы, которые, видимо, ранее не использовались: коэффициент теплопроводности для *аморфного* льда на порядок величины ниже, чем для льда с гексагональной структурой при 150 К [ $3 \cdot 10^{-3}$  против  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(см·К)], но при 50 К он на два порядка ниже, а при 20 К — на три порядка [16]. Поскольку мы ожидаем, что лед в кометах находится в аморфном состоянии, внешние слои должны обеспечить весьма эффективную теплоизоляцию внутренней полости с кипящей водой. Расчеты с точностью до порядка величины показывают, что после исчезновения источника тепла вода могла сохраняться в жидком состоянии в течение 100 млн. лет, причем наличия «гигантских» кометных тел при этом не требуется. Другое следствие столь хорошей теплоизоляции заключается в том, что и для малых

тел может быть достигнуто состояние, при котором за несколько миллионов лет расплавятся даже силикаты. Однако в этой модели затруднения возникают в связи с наличием внутри такого «сосуда» высокого давления, которое должны выдерживать его стенки, т. е. внешняя мантия ядра, а она, насколько нам известно, по-видимому, состоит из довольно хрупкого материала с малой внутренней прочностью. Об этом свидетельствуют примеры многих кометных ядер, распавшихся на два или несколько обломков. Трудно себе представить, что в момент максимального подъема температуры под действием радиоактивности  $^{26}\text{Al}$  пар, находящийся под давлением, не найдет выхода наружу и вся полость, содержащая горячую воду и пар, не будет опустошена. Я пришел к заключению, что желание найти в ядрах комет тот самый «маленький пруд», необходимый для возникновения жизни, побудило строить модели, противоречащие данным наблюдений. Данные немногочисленны, но они однозначно свидетельствуют о том, что кометы — это недифференцированные тела.

## 6. Распространенности элементов в кометах

Единственный доступный нам источник информации о химическом составе комет — это короткоживущие элементы их структуры (кома и хвост), появляющиеся в ходе распада комет в газ и пыль. В частности, спектроскопия комет выявляет только

Таблица 4

Молекулярные формы, наблюдаемые в спектрах комет

Органические	C	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	CH	CN	CO	CS	HCN	CH <sub>3</sub> CH
Неорганические	H	NH	NH <sub>2</sub>	O	OH	H <sub>2</sub> O	S		
Металлы	Na	K	Ca	V	Mn	Fe	CO	Ni	Cu
Ионы	C <sup>+</sup>	CO <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	CH <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	OH <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	CN <sup>+</sup>
Пыль	Силикаты (по инфракрасным спектрам отражения)								

те продукты деления молекул, которые покидают экзосферу кометы со скоростью, близкой к скорости звука. Эти молекулярные фрагменты (табл. 4) появляются вследствие диссоциации и ионизации неопределенных «родительских» молекул, сублимирующих с поверхности кометного ядра. Некоторые из этих фрагментов достаточно быстро преобразуются при реакциях перезарядки в «зоне соударений» ( $10^3 - 10^4$  км) вокруг ядра и их нельзя обнаружить в спектрах. В табл. 3 указаны только конечные побочные продукты этой сложной последовательности событий.

Линии металлов наблюдаются только для комет, близко подходящих к Солнцу, что позволяет предполагать испарение силикатов пылевых частиц. Полосы отражения силикатов в инфракрасной области действительно были отождествлены в солнечном свете, отраженном пылевыми частицами в хвосте.

Что касается количественного анализа, пока не было возможности составить должным образом баланс скоростей образования всех наблюдаемых молекул для какой-либо кометы. Однако с тех пор, как начались наблюдения атомных резонансных линий наиболее распространенных элементов в вакуумном ультрафиолете посредством ракет и космических телескопов, ситуация несколько улучшилась. Оказалось, что времена диссоциации большинства молекул и радикалов гораздо меньше, чем времена ионизации атомов. Поэтому существует надежда, что должная интерпретация наблюдений атомных линий элементов позволит осуществить элементный анализ летучей фракции. Однако для того, чтобы получить абсолютные значения распространенностей, требуется также знание отношения газа к пыли и природы пыли.

Единственный путь определения массового отношения пыли к газу на основе наземных наблюдений — это анализ изофот пыли в пылевом хвосте [12]. К настоящему времени получено два значения отношения пыли к газу, одно из них менее надежно из-за условий наблюдения. К счастью, более надежное значение получено при наблюдениях «новой» кометы Аренда — Ролана (1957 III). Недавно я пересмотрел это отношение и откорректировал его на основе улучшенных и более поздних данных об альбедо пыли [9]. Наконец, при прохождении перигелия кометой Аренда — Ролана это отношение изменялось. Эти данные были мной рассмотрены, и я считаю, что отношение, более близкое к первичному, достигается после прохождения перигелия. По моим оценкам, разумное значение этого первичного отношения составляет 0,70 [9].

Существует несколько групп данных в пользу того, что кометная пыль имеет природу хондритов. Во-первых, она главным образом состоит из силикатов, содержащих, вероятно, второстепенный компонент (подобный соединениям углерода), снижающий ее диэлектрические свойства [20]. Во-вторых, содержание металлов, испаряющихся с комет, проходящих вблизи Солнца, соответствует типичным для хондритов соотношениям (за исключением того, что газовая фаза слегка обеднена металлами, входящими в весьма тугоплавкие соединения [2]). В-третьих, пылевые частицы внеземного происхождения, вероятно, кометной природы, собранные в верхних слоях атмосферы, отождествлены по составу как близкие к материалу углистых хондритов [4]. Кроме того, метеорные спектры согла-

суются с предположением об их хондритной природе [19]. Поскольку пока не имеется противоположных данных, я буду полагать, что пылевая фракция комет представлена углистыми хондритами или, более точно, сходна с углистыми хондритами типа C1, которые, видимо, являются самыми древними хондритами, содержащими наибольшую долю летучих соединений. Принимая средние значения для отношений H:O, C:O и Si:O,

Таблица 5

Эвристическая модель элементного состава «новой» кометы <sup>1)</sup> в сравнении с космическими распространенностями элементов. Распространенности элементов выражены в числах атомов; число атомов кремния принято за 1000, отношение пыль/газ составляет 0,70

Символ элемента	Космическая распространенность <sup>2)</sup>	Распространенность в кометах			Отношение к космической, %
		Пыль	Газ	Всего	
H	26 600 000	2 000	24 000	26 000	0,1
C	11 700	700	4 200	4 900	42
N	2 310	50	1 100	1 150	50
O	18 400	5 000	13 400	18 400	100
S	500	350	150	500	100
Mg	1 060	1 060	—	1 060	100
Si	1 000	1 000	—	1 000	100
Fe	900	900	—	900	100
Ni + Cr	60	60	—	60	100

<sup>1)</sup> Отношение пыли к газу для кометы Арнда—Ролана («новая» комета). Средние отношения H:O, N:O, C:O и S:O для комет Беннета, Когоутека, Веста и Сарджента; принято, что состав пыли соответствует хондриту типа C1, по наблюдениям кометы Икея—Секи (проходящей близко к Солнцу) и косвенным данным.

<sup>2)</sup> Из работы Камерона [5].

выведенные из наблюдений атомных линий в вакуумном ультрафиолете для последних пяти ярких комет, и дополнив эти данные отношением N:O, к которому приводит изучение скоростей образования молекул CN и NH (поскольку атомарный N до сих пор не наблюдали), я получил табл. 5 [9], в которой представлен средний состав «усредненной» новой кометы. Из-за сложного характера картины и большого разброса данных эти результаты следует принять лишь как эвристическую модель.

Чтобы проверить сходство этой модели с межзвездным инеем, я провел расчеты эвристической модели межзвездного инея, принимая во внимание 25 наиболее распространенных межзвездных молекул, отобранных из обзора Мэнна и Уильямса [17], в отношении их средней распространенности по лучу зре-

ния. В этот список я внес только два исправления: во-первых, я предположил, что три вида наиболее летучих молекул, а именно  $H_2$ ,  $CH_4$  и  $CO$ , не остаются в инее либо потому, что они вообще не конденсируются, либо потому, что в конечном счете они теряются из-за теплового воздействия или фотоллиза [14] в тот или иной момент до аккреции кометы. Далее, я предположил, что ненаблюдаемый  $CO_2$  находится в отношении 1:6

Таблица 6

Распространенности важнейших элементов, в % по числу атомов

Элемент (отношение)	Космическая, %	Межзвезд- ный иней, %	Летучая фракция комет, %	Бактерии	Млекопи- тающие
Водород	76,50	55	56	63,0	61,0
Кислород	0,82	30	31	29,0	26,0
Углерод	0,34	12	10	6,4	10,5
Азот	0,12	1	2,7	1,4	2,4
Сера	0,0015	0,8	0,3	0,06	0,13
Фосфор	0,00002	—	—	0,12	0,13
Кальций	0,0002	—	—	—	0,23
H:O	14 000	1,8	1,8	2,2	2,3
C:O	0,64	0,43	0,32	0,22	0,40
N:O	0,12	0,03	0,08	0,05	0,09

с водой; этой важной молекулой нельзя пренебречь под предлогом того, что она не может быть обнаружена радиоастрономическими методами. Выбранное мной отношение 1:6 определяется той его долей, которая легко стабилизируется в виде клатрата с водой. В табл. 6 сравниваются две эвристические модели — для межзвездного инея и для летучей фракции комет, космические распространенности и распространенности элементов в живой природе. Результаты сравнения составов межзвездного инея и комет весьма впечатляющи, но и сравнение их с соотношением элементов, используемых живыми существами, тоже кое-что значит. Я не хочу утверждать, что для объяснения жизни следует использовать стехиометрию, а не термодинамику! Однако значимость этих результатов может состоять просто в том, что окислительно-восстановительное состояние, близкое к состоянию воды и необходимое для жизни, может автоматически обеспечиваться межзвездным инеем и кометами.

В табл. 6 я также поместил два следовых элемента (с точки зрения их космической распространенности), которые, как видно, в значительной степени концентрируются в процессах жизнедеятельности. Очевидно, кальций не имеет отношения к происхождению жизни, поскольку он появляется в качестве главного элемента довольно поздно, на стадии *metazoa*; тогда как фосфор, вероятно, связан с потребностью в источнике энергии,

который составляли минеральные фосфаты на ранней стадии, до появления фотосинтеза. Согласно общепринятой точке зрения, фосфор концентрировался в земной коре в ходе ее дифференциации, а фосфаты накапливались в осадках. У нас нет оснований пересматривать эту картину и полагать, что этот процесс мог протекать в кометах, где фосфор, понятно, не наблюдается (хотя это значит не так уж много).

## 7. Химия комет

Я попытался обрисовать модель усредненной смеси молекул, наличия которых можно ожидать в летучей фракции кометного ядра (табл. 7). В разд. 6 уже говорилось, почему это предприятие следует считать очень трудным. По этой причине мои результаты следует принимать с некоторой долей скепсиса. Табл. 7 находится в количественном согласии с отношениями распространенностей элементов, приведенными в табл. 6, и в качественном или полуколичественном согласии с данными, полученными из спектров комет. Вслед за родительской молекулой приведен список порождаемых ею молекулярных форм, наблюдаемых в кометных спектрах, но только в том случае, если их вклад в наблюдаемую линию или полосу эмиссии оценивается более, чем в 10 % ее общей интенсивности. Если предполагается, что данная родительская молекула не вносит существенного вклада в объяснение присутствия или значительного количества наблюдаемых молекулярных форм или же требуется подтверждение их отождествления, то эти наблюдаемые молекулярные формы указаны в скобках. Однако при этих оценках не учитывается возможность реакций с обменом заряда, которые способны привести к хаотической реассоциации молекулярных форм в коме крупных комет. Подводя итог, можно сказать, что для объяснения наличия родительской молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  необходимо присутствие  $\text{H}_2\text{O}^+$  и больших количеств  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$  и  $\text{H}$ , для объяснения наличия  $\text{CO}_2 - \text{CO}_2^+$  и  $\text{O}(^1D)$ , для  $\text{CH}_2\text{O} - \text{CH}$ ; для  $\text{HCN} - \text{CN}$ , для  $\text{N}_2\text{H}_4 - \text{NH}_2$ ,  $\text{NH}$  и  $\text{N}_2^+$ ; для  $\text{C}_2\text{H}_2 - \text{C}_2$ , для  $\text{C}_4\text{H}_2 - \text{C}_3$  и для  $\text{CS}_2 - \text{CS}$ . Я не буду повторять различные спектроскопические и физико-химические данные, обсуждавшиеся в работе [7]. Однако я хочу отметить, что в некоторых случаях доказательства менее надежны. Например, поскольку формальдегид не наблюдали, наличие  $\text{CH}$  можно без труда объяснить диссоциацией углеводородов или любых других органических молекул, происхождение  $\text{C}_3$  — другой случай, вызывающий сомнения. Я использовал  $\text{C}_4\text{H}_2$  скорее как условное обозначение полиацетиленовых соединений, наблюдавшихся в межзвездном пространстве и в метеоритах (карбины), но его не следует понимать буквально.

Таблица 7

## Эвристическая модель химии комет

(находится в количественном соответствии с распространенностями элементов, приведенными в табл. 5, и в качественном соответствии с наблюдаемыми спектрами)

## Льды (в % по числу молекул)

Родительские молекулы		Молекулярные формы, наблюдаемые в спектрах <sup>1)</sup>
H <sub>2</sub> O	73,0%	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , OH, H, O, (H <sub>2</sub> O)
CO <sub>2</sub>	7,3	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> , O ( <sup>1</sup> D), CO <sup>+</sup> (CO, C)
CO	4,9	(CO, CO <sup>+</sup> , C)
CH <sub>2</sub> O	4,4	CH (CO, CO <sup>+</sup> , C)
HCN	2,9	CN (HCN)
CH <sub>3</sub> CN	1,4	(CN, CH <sub>3</sub> CN)
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,8	NH <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup> (NH)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,2	C <sub>2</sub>
C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	0,7	C <sub>3</sub>
CS <sub>2</sub>	1,4	CS

## Пыль (в % по массе)

Силикаты железа и магния	78%
Вода (гидратная и адсорбированная)	12%
Соединения углерода	6%
Соединения серы	4%
Отношение пыли к снегу по массе равно 0,70	

<sup>1)</sup> Для форм, указанных без скобок, присутствие родительской молекулы подтверждается наблюдениями; запись в скобках означает, что либо в данной родительской молекуле нет необходимости, либо наблюдения требуют подтверждений; наблюдаемые молекулы не упоминаются, если родительская молекула вносит вклад в спектральную деталь менее 10%.

## 8. Обсуждение эвристической модели кометы

Замечательно, что, основываясь на отношении пыли к газу, равном 0,70, мы получаем распространенность кислорода в кометах, в точности совпадающую с его космической распространенностью. Четвертая часть кислорода находится в форме силикатов, т. е. пыли. Три четвертых входят в летучую фракцию, а именно около 60 % в составе воды и 15 % в составе CO, CO<sub>2</sub> (хотя CO может образовываться не только при фотодиссоциации CO<sub>2</sub>, но и из ненаблюдаемого предшественника типа формальдегида). По крайней мере 3/4 кислорода в синглетном

D-состоянии происходит от диссоциации  $\text{CO}_2$ , и менее  $1/4$  — за счет диссоциации воды [10].

Содержание серы, видимо, довольно велико. Поэтому я допускал, что оно достигает значения космической распространенности, но эта оценка имеет характер догадки. В отличие от кислорода,  $3/4$  серы находится в пыли и  $1/4$  в летучей фракции, вероятно, в форме  $\text{CS}_2$ .

По-видимому, наиболее интересный результат — уменьшение содержания углерода до 42 % его космической распространенности (несмотря на то, что в каждом случае имеется разброс данных, трудно получить существенно большее значение). Допустимое понижение отношения пыли к газу, скажем, до 0,5, способствовало бы повышению содержания соединений углерода в пыли, но при этом катастрофически изменится общее количество H (если углерод входит в  $\text{CH}_4$ ), или O (в случае CO или  $\text{CO}_2$ ), или и того и другого (в случае  $\text{CH}_2\text{O}$ ). Чтобы объяснить недостаток углерода наличием нерегистрируемого метана, нам придется ровно *в два раза* увеличить общее содержание водорода по линии  $\text{L}\alpha$  и умножить значение, соответствующее резонансной линии C, *на три*; это наводит на мысль о двух огромных ошибках, что крайне маловероятно. Аналогично в случае избытка  $\text{CO}_2$ , достаточного для достижения содержания углерода, равного его космической распространенности, яркость запрещенной красной линии  $\text{O}(^1D)$  пришлось бы увеличить *в три раза*, а количество кислорода находилось бы в избытке, *вдвое превышающем* его космическую распространенность. Это можно оправдать только значительным обеднением пыли металлами по сравнению с их распространенностью в космосе. Отсюда следовало бы предположение о дифференциации пыли, противоречащей аргументации в пользу ее хондритной природы [2, 4].

Итак, единственное место, где может быть скрыт недостающий углерод — это пыль, однако отсюда следовало бы, что пыль содержит 30 % углерода (в противоположность 6 % в хондритах типа CI). Возможно, что это крайне высокое содержание в конечном счете не может быть полностью исключено, несмотря на явное указание на присутствие *силикатов* в пыли, полученное в инфракрасной области [20]. Согласно этой гипотезе, предполагается наличие *больших* количеств не слишком летучих органических соединений типа аминокислот наряду с полимерами типа карбинов (полиацетиленов), которые, согласно предположениям, присутствуют в хондритных метеоритах и среди межзвездных молекул.

Другая возможность заключается в том, что весьма летучая фракция, содержащая углерод, была уже утрачена даже кометами типа Аренда — Ролана, находящимися в состоянии, близ-

ком к первичному. Поскольку содержание кислорода отвечает его космической распространенности, это может быть не СО или СО<sub>2</sub>, а только метан.

Наконец, не исключено, что метан либо никогда не конденсировался из туманности, либо испарился в ранний период, что предполагает процесс нагревания, приводящий к температурам более 50 К в туманности или позже на поверхности кометного ядра.

Очевидно, что <sup>26</sup>Al вошло в моду рассматривать как источник тепла, а поверхностная температура более 50 К, видимо, хорошо подходит в качестве граничного условия для модельных расчетов. Однако мне хотелось бы провести черту между разумными экстраполяциями имеющихся данных и теоретическими рассуждениями; в разд. 5 уже говорилось, что учет <sup>26</sup>Al уже сам по себе есть значительная экстраполяция.

## 9. Вероятная локализация предбиологических химических процессов

Чтобы представить обсуждаемую мной тему в общем виде, в табл. 8 я указал различные объекты, где могла протекать предбиологическая химическая эволюция.

Во-первых, это межзвездные облака, главным образом те плотные облака, температура которых достаточно низка, а космические лучи ионизируют определенную долю имеющихся атомов Н и Не. Посредством быстрых реакций перезарядки эти ионы способны порождать удивительно сложные органические соединения, основная часть которых была открыта за последние десять лет. Мы постепенно начинаем приходить к пониманию этих процессов в самых грубых чертах. Если верить тому, что мы видим, хотя и не понимаем, в космосе должен происходить быстрый рост полимерных цепей, поскольку уже найдены пять членов последовательности  $\text{H} - (\text{C} \equiv \text{C})_x - \text{C} \equiv \text{N}$  (с  $x$  0 до 4), причем их содержание существенно не убывает с ростом  $x$ .

В космосе существуют не только HCN и CH<sub>2</sub>O как необходимые строительные блоки предбиологической химии. Недавно сообщалось о предполагаемом присутствии глицина. Не удивительно, если в космосе окажутся и другие аминокислоты, а также пурины и пиримидины, не исключая и многого другого.

Кроме радиоастрономического отождествления, другие данные остаются скудными. В особенности отождествление каких-либо отдельных молекул по абсорбционным свойствам межзвездной пыли, вероятно, длительное время будет сомнительным, поскольку для того, чтобы привести в соответствие модель

и кривую поглощения, лишенную каких-либо четко выраженных или особых черт, имеется слишком много параметров.

Другое подходящее место для продолжения развития предбиологических химических процессов — это протосолнечная туманность. Существующие в ней градиенты температуры и давления и быстрая термическая эволюция приводят к пространственным и временным изменениям, которые могут способствовать

Таблица 8

Возможные места локализации предбиологических химических процессов

Локализация		Типичная температура, К	Концентрация частиц, см <sup>-3</sup>	Характерное время, лет	Источник нетепловой энергии
1. Межзвездные облака	Холодные	10	10 <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup>	Космические лучи
	С горячей средней частью	50	10 <sup>5</sup>	10 <sup>7</sup>	
2. Протосолнечная туманность	Наружная часть	60	10 <sup>9</sup>	10 <sup>6</sup>	Солнечный ветер в фазе Т Тельца
	Внутренняя часть	600	10 <sup>12</sup>	10 <sup>6</sup>	— „ —
3. Кометы после накопления в облаке Оорта	Поверхность	20 (или 100?)	10 <sup>19</sup>	4 · 10 <sup>9</sup>	Звездный ультрафиолет и космические лучи (26Al)
	Ядро	20 (или 500?)	10 <sup>19</sup>	10 <sup>8</sup>	
4. Периодические кометы после захвата	Поверхность	20—200	10 <sup>19</sup>	10 <sup>5</sup>	Солнечный вакуумный ультрафиолет
5. Первичная Земля	Гидросфера	330	10 <sup>19</sup>	4 · 10 <sup>8</sup>	Солнечный ультрафиолет
	Нижние слои атмосферы	330	10 <sup>16</sup>	4 · 10 <sup>8</sup>	

каталитическим химическим процессам с участием реакций Фишера — Тропша, по предположению Андерса [1]. Если аминокислоты, привнесенные межзвездным облаком в ходе его сжатия в протосолнечную туманность, разрушатся вследствие нагревания, они могут *вновь* там синтезироваться, хотя возможен и более прямой путь — сохранение их по краям солнечной туманности, где температура остается ниже 300—400 К. Часть этих предбиологических химических соединений, заключенная в конечном счете в «кометезимали», могла достигнуть земной биосферы, наконец, вкладом комет можно даже объяснить существование всей биосферы, если достаточное их количество рассеи-

валось в космос, двигаясь по все более вытянутым орбитам под действием планет-гигантов. Это приводит к общепринятому мнению, что «мелкий маленький пруд», в котором появилась жизнь, на самом деле располагается на Земле, где движущим фактором могли служить механизмы концентрирования фосфатов. Жидкая вода никогда не может образовать пруд на поверхности кометного ядра, за исключением периода в несколько часов для тех комет, у которых гелиоцентрические расстояния в перигелии составляют менее двух солнечных радиусов.

Предположение о том, что из-за нагрева, вызванного распадом  $^{26}\text{Al}$ , в центральной части комет существовала жидкая вода (которая без труда могла сохраняться 100 млн. лет благодаря хорошим теплоизолирующим свойствам аморфного льда), противоречит хотя не вполне убедительным, но взаимно согласующимся данным наблюдений. Кроме того, не ясно, может ли такое предположение даже с учетом числа комет в облаке Оорта, увеличить априорную вероятность появления жизни по сравнению с той, которую предоставляет общая поверхность первичной Земли, на которой процессы дифференциации уже привели к образованию океанов, гор, ледников, гроз, вулканов, отложений осадков и «мелких маленьких прудов». Кометы видятся мне скорее как посланники, приносящие на Землю предбиологические химические соединения межзвездного пространства. Я не знаю, на каком уровне останавливается процесс образования этих межзвездных химических соединений, и готов к неожиданностям, хотя я пока не готов принять рассуждения Хойла и Викрамасингха.

Автор выражает признательность за поддержку, оказанную Национальным научным фондом США (контракт AST — 80-18919) и НАСА (контракт NGT — 7381 «Атмосферы планет»).

## Литература

1. *Anders E.* Am. Rev. Astron. Astrophys., 9, 1, 1977.
2. *Aprigny C. L.* Proc. Welch Conference on Cosmochemistry, edit. Milligan; publ. Welch Foundation, Houston, 1978, p. 9.
3. *Adouse J., Vauclair S.* Nuclear Astrophysics, publ. Reidel — Dordrecht, Holland, 1980, p. 51.
4. *Brownlee D. E., Rajan R. S., Tomandl D. A.* In «Comets, Asteroids, Meteorites» edit. A. H. Delsemme; publ. Univ. of Toledo Bookstore, 1977, p. 137.
5. *Cameron A. G. W.* In: Origin of Solar System, edit. S. F. Dermott, publ. Wiley, New York, 1979, p. 49.
6. *Delsemme A. H.* Astron. Astrophys., 29, 377, 1973.
7. *Delsemme A. H.* Icarus, 24, 95, 1975.
8. *Delsemme A. H.* Comets, Asteroids, Meteorites, edit. A. H. Delsemme, publ. Univ. of Toledo Bookstore, p. 453.
9. *Delsemme A. H.* Workshop on modern observational techniques for comets, Goddard Space Flight Center, Oct. 1980 (preprint).
10. *Delsemme A. H.* In: Les Spectres des Molecules Simples, 21th Colloq. Internat. Astrophys. Liege, 1977, Univ. Liege, 1980, p. 515.

11. *Dermott S. F.*, editor. *Origin of Solar System.*, publ. Wiley, 1978.
12. *Finson M. L., Probststein R. F.* *Astrophys. J.*, **154**, 327, 353, 1968.
13. *Gehlers T.*, editor. *Protostars and Planets*, publ. Univ. of Arisona Press, 1978.
14. *Greenberg Mayo.* *Comets and the Origin of Life* (данный сборник), 1981.
15. *Herbig.* *Origin of Solar System*, edit. *S. F. Dermott*, publ. Wiley, New York, 1980, p. 219.
16. *Klinger J.* *Science*, **209**, 271, 1980.
17. *Mann A. P. S., Williams D. A.* *Nature*, **283**, 721, 1980.
18. *Mendis D. A., Brin G. D.* *The Moon*, **17**, 359, 1977.
19. *Millman P.* *Comets, Asteroids, Meteorites*, edit. *A. H. Delsemme*, publ. Univ. of Toledo Bookstore, 127, 1977.
20. *Ney E. P.* *Astrophys. J. Lett.*, **189**, L141, 1974.
21. *Oort J. H.* *Bull. Astronom. Instit. Netherlands*, **11**, 91, 1950.
22. *Robinson M., Rowan.* *Astrophys. J.*, **234**, 111, 1979.
23. *Сафронов В. С.* *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет.* — М.: Наука, 1969.
24. *Suess H. E. J.* *Geology*, **57**, 600, 1949.
25. *Urey H. C.* *The Planets*; publ. Yale Univ. Press. New Haven, 1952.
26. *Wetherill G. W.* *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **18**, 77, 1980.
27. *Whipple F. L.* *Mem. Soc. Roy. Sci. Liège*, 6th Series, **9**, 101, 1976.

# Кометы и фотохимия палеоатмосферы

Дж. С. Левин<sup>1)</sup>, Т. Р. Аугустсон<sup>2)</sup>, Р. Е. Боунер<sup>3)</sup>,  
М. Натараджан<sup>3)</sup>, Л. Дж. Сакс<sup>4)</sup>

Озон ( $O_3$ ) — атмосферный газ, имеющий ключевое значение в исследованиях фотохимии и химии палеоатмосферы, химической эволюции, возникновения и эволюции жизни. С помощью одномерной фотохимической модели, включающей химические реакции газов, содержащих кислород, азот, водород, углерод и хлор, исследованы фотохимические и химические процессы в палеоатмосфере с участием атмосферного  $O_3$ . Исследована также роль  $H_2O$ , приносимой кометами, в фотохимических процессах палеоатмосферы. Недавно выдвинуто предположение, что значительная часть летучих, находящихся в настоящее время в атмосфере, океанической и биосферной системах нашей планеты, появилась в результате привноса летучих веществ кометами. Приведены некоторые последствия привноса  $H_2O$  кометами для фотохимических процессов и структуры палеоатмосферы.

## 1. Возникновение атмосферы

Химическая эволюция, возникновение и эволюция жизни на нашей планете тесно связаны с возникновением и эволюцией атмосферы. Палеоатмосфера, вероятно, послужила поставщиком того материала, из которого впоследствии образовались молекулы все возрастающей сложности — предшественники жизни. В геологические периоды времени состав атмосферы регулировался рядом геохимических циклов, включающих перенос газов между атмосферой и твердыми компонентами Земли, океанами и впоследствии биосферой. Состав палеоатмосферы изменялся также и при атмосферных химических и фотохимических реакциях. Происхождение атмосферы представляет собой фундаментальную проблему. Большинство исследователей полагают, что атмосфера Земли, так же как и океаны, образова-

<sup>1)</sup> Исследовательский центр НАСА в Лэнгли, Хэмптон, шт. Виргиния 23665, США.

<sup>2)</sup> Старый Норфолкский университет, Норфолк, шт. Виргиния 23508, США.

<sup>3)</sup> Объединенный институт летных исследований Университета им. Дж. Вашингтона, Хэмптон, шт. Виргиния 23665, США.

<sup>4)</sup> Кристофер Ньюпорт Колледж, Ньюпорт-Ньюс, шт. Виргиния 23606, США; НАСА, Американское общество технического образования, стажировка в исследовательском центре НАСА в Лэнгли летом 1980 г.

лась при выделении летучих веществ, первоначально захваченных в недра нашей планеты при ее образовании (Руби, 1955). Гипотеза об образовании земной атмосферы и океанов вследствие выделения летучих веществ заняла место более ранней гипотезы, согласно которой существующая атмосфера — это остаток газовой туманности, из которой путем конденсации 4,5 млрд. лет тому назад образовалась Земля, Солнце и остальная часть Солнечной системы. Атмосферы внешних планет — Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, видимо, на самом деле могут представлять собой остатки этой газовой туманности. Геологические и геохимические доказательства в пользу образования атмосферы и океанов в результате выделения летучих веществ, обсуждаются в недавней книге Уокера [52]. При подготовке программы посадки КА «Викинг» для объяснения эволюции и состава атмосферы Марса были разработаны модели выделения летучих веществ, аналогичные земной модели [18, 29, 44]. Многие из предсказанного этими моделями, например присутствие в атмосфере определенных следов газов и возможность значительного накопления больших количеств  $H_2O$  и  $CO_2$  на поверхности или в подповерхностном слое, впоследствии было подтверждено исследованиями с помощью КА «Викинг» и рассмотрено при обсуждении их результатов на третьем коллоквиуме по химической эволюции в Колледж-Парке, посвященном сравнительной планетологии [30, 53]. Модели выделения летучих веществ, аналогичные земной, привлекались также для объяснения состава атмосферы Венеры [51, 53]. Успех гипотезы выделения летучих веществ при объяснении состава атмосфер Марса и Венеры — дополнительное свидетельство в подкрепление идеи об образовании атмосферно-океанической системы нашей планеты за счет выделения летучих веществ из ее недр.

Однако в последнее время в ряде статей рассматривается связь комет с возникновением и эволюцией атмосферы и жизни. Примерно двадцать лет тому назад Оро [43] впервые предположил, что кометы могли быть поставщиками значительной части исходных компонентов органического вещества, которые потребовались для химической эволюции и возникновения жизни. Недавно Чанг [9] выдвинул предположение, что «кометы послужили источником большей части летучих веществ, находящихся ныне в атмосфере и в океанах и, в связанном виде, в биосфере и земной коре». Среди других авторов, выдвигающих предположение, что кометы могли послужить источником летучих веществ на Земле — Уиппл [55] и Дельземм [13]. В недавно вышедшей книге Хойл и Викрамасингх [22] утверждают, что объекты кометной природы не только снабдили Землю запасом летучих веществ, но и осыпали земную поверхность

жизнью в форме живых клеток! Хотя предположение о том, что кометы доставили на раннюю Землю живые клетки и не является широко распространенной точкой зрения, все больше укрепляется мнение, что кометы могли обеспечить Землю и другие планеты земной группы заметной частью летучих соединений. Именно этой гипотезе будет посвящена часть данной статьи. Мы дадим оценку роли кометного материала в возникновении и эволюции атмосферы. Подавляющую часть летучих веществ на нашей планете составляет вода  $H_2O$ , и она же является основным летучим компонентом комет. В кометной модели «грязного льда», предложенной Уипплом, предполагается, что кометы состоят в основном из замерзшей  $H_2O$  с включениями других летучих веществ, в том числе простых и более сложных молекул, и пылевых частиц. Дельземм [13] приводит следующие обобщенные данные о распространенности элементов в кометах:  $H : C : N : O = 15 : 3 : > 0,1 : 21$  (распространенность кремния принята за единицу). Ясно, что водород и кислород — два основных элемента комет. Чтобы оценить роль комет как источника летучих веществ на Земле, мы примем, что кометы в ранний период эволюции Земли служили источником  $H_2O$ . Нами проведены расчеты тропосферно-стратосферной фотохимической модели палеоатмосферы с учетом и без учета притока  $H_2O$  от комет. Основной упор в данной работе будет сделан на исследование фотохимии палеоатмосферы, в особенности фотохимии озона  $O_3$  в геологические периоды времени. Озон — это газ, имеющий ключевое значение в исследовании происхождения и эволюции жизни на нашей планете. Он поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца в интервале 200—300 нм и защищает поверхность Земли от этого смертоносного высокоэнергетического излучения. За счет сильного поглощения солнечного ультрафиолетового излучения  $O_3$  регулирует скорости фотолитического распада многих атмосферных молекул. Озон и продукт его фотолиза — атомарный кислород в возбужденном состоянии ( $O(^1D)$ ) — представляют собой весьма реакционноспособные газы и лежат в основе множества важных химических реакций в атмосфере. Вдобавок, из всех компонентов атмосферы  $O_3$  по своему естественному содержанию наиболее близок к токсическому уровню. Наконец, благодаря своим излучательным свойствам как в ультрафиолетовой, так и в инфракрасной области  $O_3$  изменяет температуру как поверхности, так и атмосферы. Итак,  $O_3$  в значительной степени контролировал условия ультрафиолетового облучения, химический состав и температуру палеоатмосферы. По этим причинам  $O_3$  — это атмосферный газ, который сыграл ключевую роль в регуляции тех природных условий, которые дали начало возникновению и эволюции жизни на нашей планете.

Эволюция и изменчивость содержания атмосферного озона на протяжении геологической истории служили важными факторами эволюции жизни на нашей планете [2]. Происхождение и эволюция  $O_3$  тесно сопряжены с происхождением и эволюцией атмосферного кислорода  $O_2$ . В исследованиях по фотохимии палеоатмосферы уровень содержания атмосферного  $O_2$  выражают в долях от его современного уровня. Первым исследованием эволюции  $O_3$  в палеоатмосфере, обедненной  $O_2$ , был качественный анализ проблемы, осуществленный Беркнером и Маршаллом [2]. Затем Ратнер и Уокер [46] применили для исследования эволюции  $O_3$  простую фотохимическую модель — четыре реакции Чэпмена для атмосферы чистого  $O_2$  без учета переноса.

В середине и в конце 70-х годов уровень наших знаний о реакциях в атмосфере и их скоростях в целом и о фотохимии  $O_3$  в частности резко возрос, главным образом в связи с озабоченностью, вызванной разрушением стратосферного  $O_3$  вследствие антропогенной деятельности. Новое понимание фотохимии стратосферного  $O_3$  нашло отражение в более сложных и утонченных фотохимических моделях, разработанных для изучения эволюции  $O_3$ . Хестведт и др. [21] в своем исследовании дополнили реакции Чэпмена химическими превращениями соединений водорода, как с учетом, так и без учета вертикального переноса. Блейк и Карвер [3] в дополнение к соединениям водорода и кислорода в изучении эволюции  $O_3$  ввели соединения азота, метан  $CH_4$  и двуокись углерода  $CO_2$ . В своей модели они принимали фотохимическое равновесие, т. е. в их вычислениях не было отражено влияние вертикального переноса молекул на их распределение. Левин и др. [34] приняли во внимание стратосферные химические процессы с участием соединений кислорода, водорода и азота, плюс влияние вертикального переноса на распределение подлежащих расчету соединений в атмосфере. Они также впервые ввели в рассмотрение закись азота  $N_2O$ . Окисление  $N_2O$  является главным источником окислов азота, которые регулируют уровень  $O_3$  в современной атмосфере. Профили содержания соединений азота и водорода в обедненной  $O_2$  палеоатмосфере были впервые приведены Левиным и др. [34].

Связь  $O_3$  и температуры в палеоатмосфере, обедненной  $O_2$ , изучалась Кацумори [28] и Левиным и Боунером [32]. Кацумори [28] объединил фотохимическую схему Чэпмена для атмосферы из чистого  $O_2$  с лучисто-конвекционной температурной моделью. Левин и Боунер [32] объединили набор атмосферных фотохимических процессов, использованный Левиным и др. [34] с лучисто-конвекционной моделью Раманатана [45] и показали, что эффекты излучения  $O_3$  могли иметь большое значение для палеоатмосферы. Для изучения солнечной ультрафиолетовой радиации, переносимой через палеоатмосферу и падающей

на поверхность Земли, использовались фотохимические расчеты  $O_3$  для различных уровней содержания  $O_2$  [31, 33].

Вслед за ними Кэстинг и Донахью [26] исследовали эволюцию  $O_3$  с помощью подробной тропосферно-стратосферной фотохимической модели, включающей химические превращения соединений кислорода, водорода, азота и углерода наряду с их вертикальным переносом. Модель Кэстинга и Донахью [26] впервые содержала реалистическую схему тропосферных химических процессов, в том числе цепь окисления метана, вынос с осадками из тропосферы растворимых следовых соединений и учет молний, вызывающих образование «нечетного» азота (в дополнение к окислению  $N_2O$ ). Вдобавок, эта модель содержала самосогласованные вычисления стратосферных профилей водяного пара для различных уровней содержания  $O_2$ .

В данном исследовании мы применили подробную тропосферно-стратосферную модель, включающую химические превращения соединений кислорода, водорода, азота, углерода и, впервые, хлора. Кроме того, эта модель, как и модель Кэстинга и Донахью [26], включала реалистическую схему тропосферных химических процессов, в том числе цепь окисления метана, вынос растворимых следовых соединений из тропосферы с осадками и реалистические значения поверхностных притоков химических соединений, и, вдобавок, химические превращения соединений хлора.

## 2. Описание модели

Модель тропосферно-стратосферных фотохимических процессов, используемая в данной статье, основана на модели Натараджана [42], применявшейся для изучения фотохимии  $O_3$  в современной атмосфере. Базисная модель была обновлена путем включения в нее новых реакций и пересмотренных значений скоростей реакций [24]. Модель была дополнена набором химических превращений соединений хлора, аналогичным описанному у Боунера и Нили [4]. В данной модели решались сопряженные уравнения неразрывности и потока для следующих соединений:  $O_3$ ,  $O$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $HNO_3$ ,  $N_2O_5$ ,  $HNO_2$ ,  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CH_3OOH$ ,  $CH_2O$ ,  $Cl$ ,  $ClO$ ,  $HCl$ ,  $CH_3Cl$  и  $ClNO_2$ . К весьма короткоживущим соединениям, для которых было принято мгновенное фотохимическое равновесие, относились  $O(^1D)$ ,  $H$ ,  $N$ ,  $CH_3$ ,  $HCO$ ,  $CH_3O_2$ ,  $CH_3O$ ,  $ClO_2$  и  $Cl_2$ . Список реакций фотодиссоциации с указанием их скоростей приведен в табл. 1. В табл. 2 приведен список химических реакций. В данной модели принималось, что с осадками выносятся (с коэффициентом выноса  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) следующие водорастворимые соединения:  $HNO_3$ ,  $H_2O_2$  и  $CH_3OOH$ . Вслед за Крутценом

Таблица 1

Реакции фотодиссоциации и их среднесуточные скорости  
(в условиях равновесия) на высоте 53,5 км для широты 30°  
(в современной атмосфере)

Номер реакции	Реакция	Скорость, с <sup>-1</sup>
J1:	$O_2 + h\nu \rightarrow O + O$	$1,41 \cdot 10^6$
J2:	$O_3 + h\nu \rightarrow O + O_2$	$4,40 \cdot 10^6$
J3:	$O_3 + h\nu \rightarrow O(^1D) + O_2$	$7,07 \cdot 10^7$
J4:	$H_2O + h\nu \rightarrow OH + H$	$5,32 \cdot 10^2$
J5:	$N_2O + h\nu \rightarrow O(^1D) + N_2$	$1,29 \cdot 10^2$
J6:	$HNO_3 + h\nu \rightarrow OH + NO_2$	$2,63 \cdot 10^0$
J7:	$NO_2 + h\nu \rightarrow O + NO$	$1,33 \cdot 10^4$
J8:	$H_2O_2 + h\nu \rightarrow OH + OH$	$2,52 \cdot 10^2$
J9:	$HNO_2 + h\nu \rightarrow OH + NO$	$4,31 \cdot 10^1$
J10:	$NO_3 + h\nu \rightarrow NO + O_2$	$7,85 \cdot 10^{-1}$
J11:	$NO_3 + h\nu \rightarrow NO_2 + O$	$7,85 \cdot 10^0$
J12:	$N_2O_5 + h\nu \rightarrow NO_2 + NO_3$	$5,21 \cdot 10^{-4}$
J13:	$HCl + h\nu \rightarrow H + Cl$	$1,47 \cdot 10^0$
J14:	$ClO_2 + h\nu \rightarrow ClO + O$	$6,41 \cdot 10^{-3}$
J15:	$ClO + h\nu \rightarrow Cl + O$	$1,45 \cdot 10^2$
J16:	$Cl_2 + h\nu \rightarrow Cl + Cl$	$1,43 \cdot 10^{-6}$
J17:	$ClNO_3 + h\nu \rightarrow ClO + NO_2$	$4,77 \cdot 10^{-4}$
J18:	$CCl_4 + h\nu \rightarrow 2Cl + \text{продукты}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$
J19:	$CH_3Cl + h\nu \rightarrow CH_3 + Cl$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
J20:	$CH_2O + h\nu \rightarrow H + HCO$	$4,00 \cdot 10^1$
J21:	$CH_2O + h\nu \rightarrow H_2 + CO$	$4,15 \cdot 10^1$
J22:	$CH_3CCl_3 + h\nu \rightarrow Cl + \text{продукты}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
J23:	$CH_3OON + h\nu \rightarrow CH_3O + OH$	$1,82 \cdot 10^0$
J24:	$NO + h\nu \rightarrow N + O$	$9,12 \cdot 10^1$

Таблица 2

## Химические реакции

№	Реакция	Константа скорости, см <sup>3</sup> /с или см <sup>6</sup> /с
1	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$1,1 \cdot 10^{-34} \text{ exp}(510/T)$
2	$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	$1,5 \cdot 10^{-11} \text{ exp}(-2218/T)$
3	$O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$	$2,9 \cdot 10^{-11} \text{ exp}(67/T)$
4	$O(^1D) + N_2 \rightarrow O + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-11} \text{ exp}(107/T)$
5	$N_2O + O(^1D) \rightarrow 2NO$	$5,9 \cdot 10^{-11}$
6	$N_2O + O(^1D) \rightarrow N_2 + O_2$	$5,1 \cdot 10^{-11}$
7	$NO + O + M \rightarrow NO_2 + M$	$1,6 \cdot 10^{-32} \text{ exp}(584/T)$
8	$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	$2,3 \cdot 10^{-12} \text{ exp}(-1450/T)$

Продолжение табл. 2

№	Реакция	Константа скорости, см <sup>3</sup> /с или см <sup>6</sup> /с
9	$\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	$9,3 \cdot 10^{-12}$
10	$\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$	$1,2 \cdot 10^{-13} \exp(-2450/T)$
11	$\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	$3,4 \cdot 10^{-12} \exp(250/T)$
12	$\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{M}$	См. [14]
13	$\text{HNO}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$8,5 \cdot 10^{-14}$
14	$\text{H}_2\text{O} + \text{O}(^1D) + 2\text{OH}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$
15	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$2,1 \cdot 10^{-32} \exp(290/T)$
16	$\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$1,4 \cdot 10^{-10} \exp(-470/T)$
17	$\text{OH} + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2$	$4,0 \cdot 10^{-11}$
18	$\text{OH} + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$	$1,6 \cdot 10^{-12} \exp(-940/T)$
19	$\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$	$1 \cdot 10^{-11} \exp(-500/T)$
20	$\text{HO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$3,5 \cdot 10^{-11}$
21	$\text{HO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + 2\text{O}_2$	$1,1 \cdot 10^{-14} \exp(-580/T)$
22	$\text{HO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$4 \cdot 10^{-11}$
23	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,5 \cdot 10^{-12}$
24	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1 \cdot 10^{-11} \exp(-750/T)$
25	$\text{OH} + \text{NO} + \text{M} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{M}$	См. [14]
26	$\text{NO} + \text{NO}_3 \rightarrow 2\text{NO}_2$	$1,9 \cdot 10^{-11}$
27	$\text{O}(^1D) + \text{N}_2 + \text{M} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{M}$	$3,5 \cdot 10^{-37}$
28	$\text{O}(^1D) + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	$9,9 \cdot 10^{-11}$
29	$\text{O}(^1D) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_3$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
30	$\text{NO}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{M}$	$1,0 \cdot 10^{-31}$
31	$\text{NO}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_5$	$1,5 \cdot 10^{-13} \exp(861/T)$
32	$\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_3$	$1,2 \cdot 10^{14} \exp(-10319/T)$
33	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$	$1,0 \cdot 10^{-20}$
34	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{O} \rightarrow 2\text{NO}_2 + \text{O}_2$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
35	$\text{N} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	$2,1 \cdot 10^{-11} \exp(-800/T)$
36	$\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	$4,4 \cdot 10^{-12} \exp(-32220/T)$
37	$\text{N} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$
38	$\text{N} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-15}$
39	$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$	$2,8 \cdot 10^{-11} \exp(-257/T)$
40	$\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$	$7,7 \cdot 10^{-11} \exp(-130/T)$
41	$\text{ClO} + \text{NO} \rightarrow \text{Cl} + \text{NO}_2$	$7,8 \cdot 10^{-12} \exp(250/T)$
42	$\text{Cl} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{HCl} + \text{CH}_3$	$9,9 \cdot 10^{-12} \exp(-1359/T)$
43	$\text{Cl} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{H}$	$3,5 \cdot 10^{-11} \exp(-2290/T)$
44	$\text{Cl} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{O}_2$	$4,5 \cdot 10^{-11}$
45	$\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{HO}_2$	$1,7 \cdot 10^{-12} \exp(-384/T)$
46	$\text{Cl} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{HCl} + \text{NO}_3$	$1,0 \cdot 10^{-11} \exp(-2170/T)$
47	$\text{Cl} + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \text{HCO}$	$9,2 \cdot 10^{-11} \exp(-68/T)$
48	$\text{HCl} + \text{OH} \rightarrow \text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$	$2,8 \cdot 10^{-12} \exp(-425/T)$
49	$\text{HCl} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{OH}$	$1,1 \cdot 10^{-11} \exp(-3370/T)$
50	$\text{Cl} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{ClO}_2 + \text{M}$	См. [14]
51	$\text{ClO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2 + \text{M}$	$2,7 \cdot 10^{-9} \exp(-2650/T)$
52	$\text{Cl} + \text{ClO}_2 \rightarrow 2\text{ClO}$	$5,0 \cdot 10^{-12}$
53	$\text{Cl} + \text{ClO}_2 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
54	$\text{OH} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{M}$	См. [14]
55	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{HO}_2$	$2,8 \cdot 10^{-12} \exp(-2125/T)$

Продолжение табл. 2

№	Реакция	Константа скорости. см <sup>3</sup> /с или см <sup>6</sup> /с
56	$\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$2,4 \cdot 10^{-12} \exp(-1710/T)$
57	$\text{ClO} + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{ClONO}_2 + \text{M}$	См. [14]
58	$\text{O} + \text{ClNO}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{NO}_3$	$3,0 \cdot 10^{-12} \exp(-808/T)$
59	$\text{O} (^1D) + \text{HCl} \rightarrow \text{OH} + \text{Cl}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
60	$\text{H}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$1,2 \cdot 10^{-11} \exp(-2200/T)$
61	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2 + \text{M}$	См. [14]
62	$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OOH} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-12}$
63	$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{NO}_2$	$8 \cdot 10^{-12}$
64	$\text{CH}_3\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{HO}_2$	$5 \cdot 10^{-13} \exp(-2000/T)$
65	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,7 \cdot 10^{-11} \exp(-100/T)$
66	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{HCO}$	$2,8 \cdot 10^{-12} \exp(-1540/T)$
67	$\text{HCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{HO}_2$	$5,0 \cdot 10^{-12}$
68	$\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$	См. [14]
69	$\text{CH}_3\text{Cl} + \text{OH} \rightarrow \text{Cl} + \text{продукты}$	$1,9 \cdot 10^{-12} \exp(-1142/T)$
70	$\text{CH}_3\text{OOH} + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6,2 \cdot 10^{-12} \exp(-750/T)$
71	$\text{O}_3 + \text{CH}_3\text{CCl}_3 \rightarrow \text{Cl} + \text{продукты}$	$2,5 \cdot 10^{-12} \exp(-1450/T)$

и др. [12] мы включили также вынос водорастворимых соединений хлора HCl, ClO и ClNO<sub>3</sub>. В своих расчетах мы принимали стандартный тропосферный профиль для паров H<sub>2</sub>O [34]. Для соединений N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO и HCl были приняты определенные значения восходящих поверхностных потоков. Восходящие потоки для N<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub> составляли  $1,73 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> и  $2,05 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> соответственно. При этом расчетные профили распределения этих соединений согласовывались с результатами измерений в современной атмосфере. В современной атмосфере CO имеет главным образом антропогенное происхождение, причем восходящий поток его с поверхности составляет около  $1,2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> [7]. Для добиологической атмосферы использовано значение потока CO, равное  $3,2 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, основанное на современном выделении CO вулканами [27]. Восходящий поверхностный поток HCl будет рассмотрен в следующем разделе. Принято, что убыль озона на поверхности соответствует скорости 0,2 см/с, согласно Кэстингу и Донахью [26].

Вслед за работой [34] мы использовали современные значения уровня атмосферного азота N<sub>2</sub>, который не относится к химически активным соединениям и служит лишь в качестве третьей частицы в тримолекулярных реакциях. Основываясь на сопряженных фотохимических и лучисто-конвекционных температурных расчетах палеоатмосферы, проведенных Левиным и Боунером [33], мы использовали для случая современного уровня O<sub>2</sub> стандартный весенне-осенний температурный профиль для средних широт США и палеоатмосферный профиль темпе-

ратуры, линейно убывающий от тропопаузы к мезопаузе для случая содержания  $O_2$ , составляющего  $10^{-1}$  от современного уровня и менее. Профиль турбулентной диффузии ( $K_z$ ) взят нами из работы Мак-Элроя и др. [40]. Хотя мы понимаем, что профиль турбулентной диффузии сильно зависит от температурного профиля, определение профиля диффузии, отвечающего нашему палеоатмосферному температурному профилю, вышло за рамки данного исследования. Можно предположить, что коэффициент турбулентной диффузии в палеоатмосфере превосходил его значение для современной стратосферы, поскольку в атмосферном режиме отрицательного температурного градиента следует ожидать повышенного вихревого перемешивания. Левин и др. [34] исследовали чувствительность расчетных профилей  $O_3$  в палеоатмосфере по отношению к задаваемым профилям диффузии и нашли, что при возрастании коэффициента турбулентной диффузии Мак-Элроя и др. [40] в 10 раз для уровня содержания  $O_2$ , составляющего  $10^{-1}$  от современного, происходит 25 %-ное возрастание интегрального содержания  $O_3$ . При уровнях содержания  $O_2$ , составляющих менее  $10^{-1}$  современного, для профилей  $10 \cdot K_z$  не наблюдалось заметных изменений интегрального содержания  $O_3$ .

Расчеты проводили для высот от поверхности до 53,5 км с расстоянием между узлами сетки 1 км в интервале до 10 км и 1,5 км для высот от 10 км до 53,5 км. В соответствии с методикой Рандела [48] скорости фотодиссоциации представляли собой среднесуточные значения для широт  $30^\circ$  (условия равенства). Для расчетов принималось значение потока солнечной радиации в диапазоне 110—735 нм, приведенное Экерманом [1]. Вычисления скорости фотодиссоциации  $O_2$  в полосе Шумана — Рунге (от 175 до 205 нм) основывались на данных Хадсона и Мале [23].

### 3. Фотохимия палеоатмосферного озона

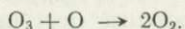
В современной атмосфере около 90 % общего количества озона находится в стратосфере. Именно этот озон и защищает поверхность Земли от смертоносного ультрафиолетового излучения. Образование стратосферного  $O_3$  является следствием фотолиза молекулярного кислорода  $O_2$  под действием ультрафиолета (реакция J1), приводящего к атомарному кислороду O. Затем следует тримолекулярная рекомбинация O,  $O_2$  и M (реакция 1). В незагрязненной тропосфере образование  $O_3$  связано с фотолизом  $NO_2$  под действием видимого света (реакция J7), приводящим к атомам O. Затем также следует тримолекулярная рекомбинация (реакция 1). Основные механизмы убыли

$O_3$  в современной тропосфере — это реакции с  $HO_2$  (реакция 21),  $OH$  (реакция 18) и потери на поверхности Земли [19].

Стратосферный  $O_3$  разрушается при реакции с  $O$  (реакция 2) и в ходе нескольких каталитических циклов, включающих  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ),  $HO_x$  ( $H + OH + HO_2$ ) и  $ClO_x$  ( $Cl + ClO$ ). Каталитический цикл  $NO_x$  представлен реакциями



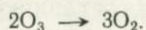
Каталитический цикл  $NO_x$  приводит к итоговой реакции:



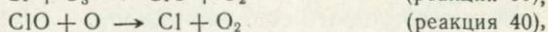
Каталитический цикл  $HO_x$  представлен реакциями



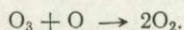
которые приводят к итоговой реакции:



Каталитический цикл  $ClO_x$  представлен реакциями



которые приводят к итоговой реакции:



Обсуждение этих каталитических стратосферных циклов и отождествление скорость-определяющих реакций приводится в работе Джонстона и Подольске [25].

Основной источник  $NO_x$  в современной стратосфере — окисление азота  $N_2O$  (реакция 5). Подавляющая часть  $N_2O$  образуется в результате деятельности микроорганизмов на поверхности Земли, хотя, как недавно показано, локальным источником  $N_2O$  являются также молнии в атмосфере [35]. Главный источник  $OH$  и, следовательно, соединений типа  $HO_x$  в современной атмосфере — это окисление  $H_2O$  с помощью  $O(^1D)$  (реакция 14). Естественными источниками атмосферного хлора являются частицы морской соли и вулканы. Предыдущие исследования  $O_3$  в палеоатмосфере учитывали химические реакции соединений типа  $NO_x$  и  $HO_x$ . Левин и др. [34] обнаружили, что эффективное проникновение солнечного ультрафиолетового излучения вглубь палеоатмосферы, обедненной  $O_2$ , приводило к фотолитической потере  $N_2O$  (реакция J5) за счет образования  $NO$  (реакция 5). На рис. 1 показано вертикальное распределение  $N_2O$  в тропосфере и стратосфере для различных уровней содержания  $O_2$ . Во всех этих расчетах был принят современный поверхностный приток  $N_2O$ , равный  $1,73 \cdot 10^9$  молекул/( $cm^2 \times$

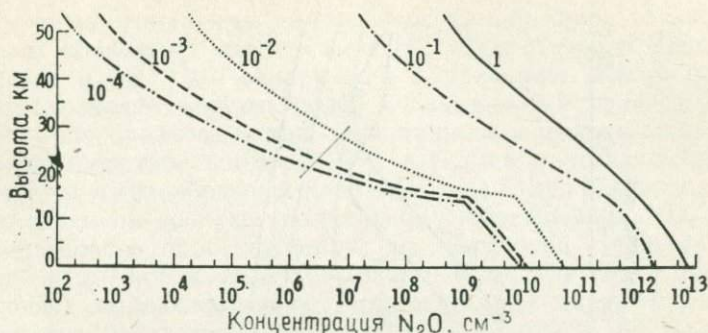


Рис. 1. Вертикальное распределение закиси азота  $N_2O$  для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 по отношению к современному (поток  $N_2O$  на поверхности  $1,7 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>).

Х с). Эффективный фотолитический распад  $N_2O$  существенно снижал роль распада  $O_3$  в ходе каталитического цикла с участием  $NO_x$  в палеоатмосфере. В то же время Левин и др. [34] нашли, что эффективное проникновение солнечного ультрафиолетового излучения приводит к эффективному образованию  $OH$  посредством фотолиза  $H_2O$  (реакция J4), что приводит к возрастанию уровней содержания  $OH$  и  $HO_x$  на несколько порядков по сравнению с современной атмосферой. Вертикальные распределения  $OH$  в тропосфере и стратосфере при различных уровнях содержания  $O_2$  приведены на рис. 2. Было найдено, что эти повышенные концентрации молекул  $HO_x$  и регулируют уровень содержания  $O_3$  в палеоатмосфере [34]. Видимо,  $CH_4$  и  $CO$ , два газа, имеющих важное значение в фотохимическом образовании  $O_3$  в современной тропосфере, для палеоатмосферы важного значения не имели. Повышенные уровни содержания  $OH$  в палеоатмосфере наряду с повышенным уровнем солнечного ультрафиолетового излучения приводили к эффективной химической (реакция 56) и фотохимической убыли  $CH_4$ . В современной атмосфере  $CO$  имеет главным образом антропогенную природу, образуясь при процессах горения. В отсутствие деятельности человека восходящий поток  $CO$  был, вероятно, примерно на три порядка ниже, причем единственным природным источником  $CO$  в палеоатмосфере были вулканы. Поэтому представляется вероятным, что те три газа, которые поступают в атмосферу с поверхности и имеют важное значение в фотохимии озона современной тропосферы и стратосферы, т. е.  $N_2O$ ,  $CH_4$  и  $CO$ , оказывали пренебрежимо малое влияние на фотохимические процессы с участием озона в палеоатмосфере, обедненной  $O_2$ . До настоящего исследования влияние хлорсодержащих соединений и каталитического цикла  $ClO_x$  на фотохимию  $O_3$  в работах по фотохимии палеоатмосферы не учитывалось.

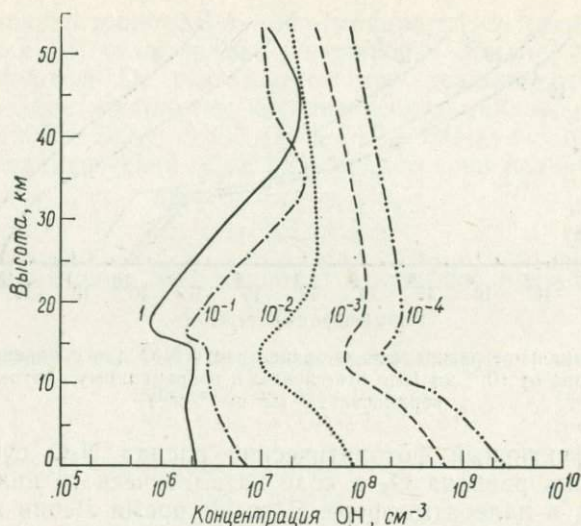


Рис. 2. Вертикальное распределение гидроксильного радикала ОН для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 по отношению к современному.

В данной работе мы приняли во внимание химические процессы с участием соединений типа  $ClO_x$  и начнем с краткого обсуждения естественных источников хлорсодержащих соединений в палеоатмосфере.

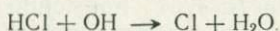
Широко распространено мнение, что преобладающий вид соединений хлора в тропосфере — это хлористый водород  $HCl$  [11]. Далее, полагают, что преобладающий источник  $HCl$  — конверсия морских солей, причем общая мощность его оценивается в  $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [10, 15]. В процессе конверсии морских солей лопающиеся пузырьки, которые образуются при разрушении волн на поверхности моря, выбрасывают в воздух некоторое количество мелких капелек. Эти капельки вскоре испаряются, оставляя частицы морской соли (хлорида натрия). Предполагается, что попав в атмосферу, эти частицы морских солей образуют  $HCl$ , либо при реакции с  $H_2SO_4$ , образующейся из  $SO_2$  [16, 17], либо при реакции с  $HNO_3$ , образующейся из  $NO_2$  [47]. В современной тропосфере источники как  $SO_2$ , так и  $NO_2$  связаны с деятельностью человека (ср. [37]); однако в палеоатмосфере существовали значительные естественные источники  $SO_2$  и  $NO_2$  и в отсутствие антропогенных источников. Источником  $SO_2$  являются вулканы [38], а источником  $NO_x$  — атмосферные молнии (ср. [8, 7, 36]). Таким образом, как  $SO_2$ , так и  $NO_2$ , видимо, присутствовали в палеоатмосфере и могли служить предшественниками в образовании  $H_2SO_4$  и  $HNO_3$  соответствен-

но, которые необходимы для высвобождения хлора из аэрозоля морских хлоридных солей в виде  $\text{HCl}$ . Буа-Менар и Шесле [5] и Шесле и др. [10] обнаружили корреляцию между потерей хлора аэрозолем морских солей и повышенным уровнем содержания газообразного хлора. Они пришли к выводу, что в глобальном масштабе примерно 3 % аэрозоля морских солей превращается в газообразный хлор. Мартенс и др. [39] нашли, что в загрязненном воздухе (по-видимому, обогащенном  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$  антропогенного происхождения) из аэрозолей теряется 54 % хлора, а в чистом воздухе — около 13 %. Согласно оценкам, ежегодное выделение частиц морских солей мировым океаном составляет  $10^{10}$  т, что соответствует примерно  $6 \cdot 10^9$  т хлора в составе частиц в год [15]. Если 10 % хлора в составе частиц превратятся в газообразный хлор, процесс конверсии морских солей приведет к образованию около  $6 \cdot 10^8$  т газообразного хлора в год, что соответствует примерно  $10^{10}$  атомам  $\text{Cl}$  на  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$  [15].  $\text{HCl}$  является также газом, который в незначительных количествах встречается в вулканических выбросах, как больших (извержения), так и малых (фумаролы) [6, 38]. Содержание  $\text{HCl}$  в вулканических газах может быть различным, но в среднем составляет 0,5 — 1 % общего объема газа, выбрасываемого вулканами [38]. Кроме того, как показывают измерения,  $\text{HCl}$  и  $\text{CO}$  испускаются вулканами в сравнимых количествах [38]. Современный усредненный суммарный приток вулканического  $\text{CO}$  оценивается приблизительно в  $3,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$  [27, 53]. Как отмечает Уокер [52], приток вулканических газов на ранних стадиях эволюции Земли мог быть значительно больше. Поскольку мощность вулканического источника  $\text{HCl}$  в палеоатмосфере неизвестна, мы приняли, что восходящий поверхностный поток  $\text{HCl}$  составлял  $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что, как полагают, эквивалентно выделению  $\text{HCl}$  вследствие конверсии морских солей в современной атмосфере [10, 15].

Другой естественный источник атмосферного хлора, возможно существовавший в палеоатмосфере, — это хлористый метил  $\text{CH}_3\text{Cl}$ . Хотя происхождение  $\text{CH}_3\text{Cl}$  точно не известно, полагают, что он образуется вследствие биологической активности моря [56]. Средний суммарный поверхностный приток  $\text{CH}_3\text{Cl}$  в современной атмосфере оценивается приблизительно в  $2,6 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [11]. Это примерно на два порядка ниже, чем мощность источника хлора, обусловленного, как полагают, хлористым водородом, образующимся при конверсии морских солей. Как показывают наши расчеты, добавление поверхностного притока  $\text{CH}_3\text{Cl}$  к притоку  $\text{HCl}$  оказывает пренебрежимо малое влияние на химические процессы с участием  $\text{O}_3$  в палеоатмосфере по сравнению с влиянием учета только поверхностного притока  $\text{HCl}$ . По этой причине, а также из-за вероятного био-

логического происхождения  $\text{CH}_3\text{Cl}$  мы в своих расчетах приняли поверхностный приток  $\text{CH}_3\text{Cl}$  в палеоатмосфере равным нулю.

Существенно повышенный уровень ультрафиолетовой радиации в условиях палеоатмосферы, низводящий как  $\text{N}_2\text{O}$ , так и  $\text{CH}_4$  на второстепенные роли в фотохимических процессах, имеет также важное значение в определении воздействия  $\text{HCl}$  на уровень  $\text{O}_3$  в палеоатмосфере как непосредственным образом, так и косвенно. Как упоминалось ранее, эффективное проникновение ультрафиолетового излучения в палеоатмосферу приводило к сильному возрастанию концентрации  $\text{OH}$  в тропосфере (реакция J4). Радикалы  $\text{OH}$  играют решающую роль в определении общего соотношения хлора в его реакционноспособных фрагментах ( $\text{Cl}$  и  $\text{ClO}$ ) и в менее активных формах ( $\text{HCl}$  и  $\text{ClONO}_2$ ) посредством реакций, подобных реакции 48:



В современной атмосфере реакция  $\text{OH}$  с  $\text{HCl}$  существенна главным образом в нижних слоях стратосферы. Однако в современной атмосфере, прежде чем  $\text{HCl}$  сможет продиффундировать вверх в стратосферу, он расходуется в тропосфере из-за выноса осадками. Оценки времени жизни  $\text{HCl}$  в современной атмосфере составляют от 1 до 10 сут [11]. Поскольку характерное время диффузии  $\text{HCl}$  в стратосферу составляет около 40 сут, большая часть  $\text{HCl}$  выносится с осадками из тропосферы прежде, чем достигнет стратосферы. Это приводит к быстрому убыванию содержания  $\text{HCl}$  в тропосфере с высотой. Шкала высот для  $\text{HCl}$  в современной тропосфере по оценкам составляет от 2,5 до 4,2 км [49]; для сравнения можно отметить, что средняя шкала высот для тропосферы составляет 8 км. Вычисленный нами профиль распределения атомарного хлора в современной атмосфере и палеоатмосфере приведен на рис. 3. Для всех этих расчетов мы использовали коэффициент выноса осадками, равный  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , отвечающий характерному времени выноса, приблизительно равному 11 сут.

Высвобождаясь из  $\text{HCl}$ , атомы  $\text{Cl}$  могут разрушать  $\text{O}_3$  посредством каталитического цикла  $\text{ClO}_x$ , представленного следующими реакциями:



Эти две реакции приводят к следующей итоговой реакции:



Свободные атомы  $\text{Cl}$  могут также вступать в реакцию с  $\text{CH}_4$  (реакция 42),  $\text{H}_2$  (реакция 43) и с соединениями типа  $\text{HO}_x$  (ре-

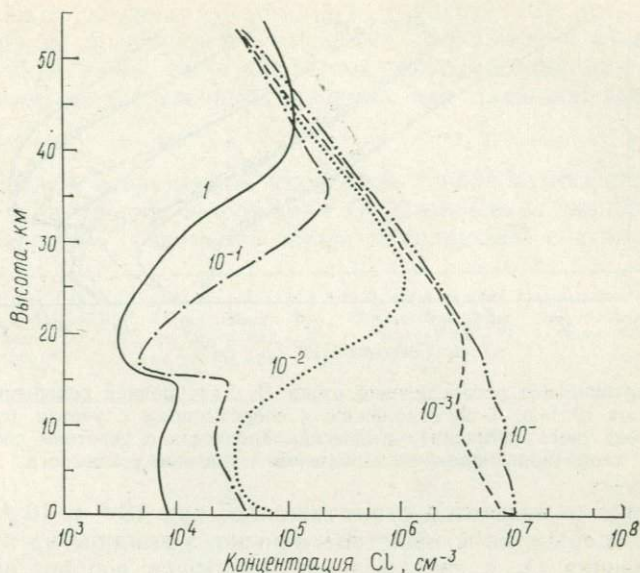


Рис 3. Вертикальное распределение атомарного хлора Cl для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 по отношению к современному.

акции 44, 45 и 47), вновь образуя HCl. При пониженных уровнях  $O_2$  убыль HCl за счет выноса осадками пренебрежимо мала и тропосферный профиль HCl определяется равновесием между его притоком на поверхности и его образованием и разрушением в химических процессах, которые примерно равны. В этом состоит отличие от современной атмосферы, в которой преобладающая убыль HCl в тропосфере связана главным образом с выносом осадками.

На рис. 4 показано вертикальное распределение  $O_3$  для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне  $10^{-4}$  — 1 современного уровня как с учетом, так и без учета химических превращений соединений хлора. Профили, показанные сплошными линиями, соответствуют профилям распределения  $O_3$  с учетом химических превращений соединений хлора, а пунктирные линии отвечают профилям  $O_3$  без учета этих превращений. В табл. 3 суммированы важнейшие особенности всех расчетных профилей  $O_3$ , обсуждаемых в этой статье, т. е. максимальная плотность  $O_3$ , высота, отвечающая максимуму  $O_3$ , и интегральная концентрация  $O_3$  в столбе как функции уровня содержания  $O_2$ .

Рис. 4 и табл. 3 показывают, что учет соединений хлора оказывает наибольшее воздействие на профиль распределения  $O_3$  при уровне содержания  $O_2$ , равном  $10^{-3}$  современного. При уровне содержания  $O_2$ , составляющем  $10^{-2}$  современного уровня,

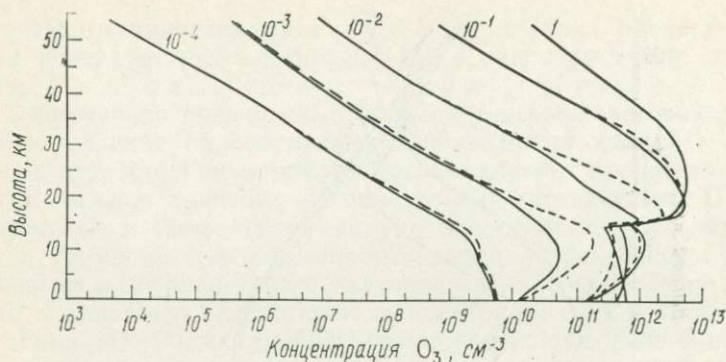


Рис. 4. Вертикальное распределение озона  $O_3$  для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 по отношению к современному с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктир) химических процессов с участием соединений хлора при современном значении солнечной светимости.

воздействие оказывается существенным; при  $10^{-1}$  и  $10^{-4}$  современного содержания воздействие меньше, а влияние на профиль распределения  $O_3$  в современной атмосфере вообще незначительно. Для уровня содержания  $O_2$ , равного  $10^{-3}$  современного, учет хлора понижает интегральную концентрацию в столбе  $O_3$  более чем на 60 %, а максимальное значение концентрации  $O_3$  снижается более чем в три раза. Для уровня содержания  $O_2$ , составляющего  $10^{-2}$  современного, учет хлора понижает интегральную концентрацию в столбе  $O_3$  более чем на 35 %, а максимальная концентрация  $O_3$  уменьшается более чем в два раза.

На рис. 5 приведены изменения интегральной концентрации в столбе  $O_3$  для различных уровней содержания  $O_2$  по данным различных исследований. Все предыдущие фотохимические исследования эволюции  $O_3$ , в которых вычислялись значения интегральной концентрации в столбе  $O_3$ , т. е. работы [3, 28, 34, 35, 46], показали, что максимум интегральной концентрации в столбе  $O_3$  приходится на содержание  $O_2$ , составляющее  $10^{-1}$  современного уровня. Однако до исследования Кэстинга и Донахью [26] ни одно из предшествующих исследований не включало реалистической формулировки тропосферных процессов, в том числе химических, т. е. учета химии и фотохимии тропосферы, потерь  $O_3$  на поверхности и выноса растворимых соединений из тропосферы с осадками. Вместо этого в ранних моделях принималась точка зрения, согласно которой по мере снижения уровня  $O_2$  химические процессы, типичные для современной стратосферы, перемещались в более низкие атмосферные слои. Во всех этих моделях было найдено, что максимум интегральной концентрации в столбе  $O_3$  соответствует уровню содержания  $O_2$ , равному  $10^{-1}$  современного. Мы считаем, что раз-

личия между расчетами Кэстинга и Донахью [26], представленными кривой 3, и нашими моделями (кривые 4 и 5) связаны со способом вычисления скоростей фотодиссоциации. Мы использовали среднесуточные значения для заданной широты и

Таблица 3

Озон в современной атмосфере и палеоатмосфере:  
влияние уровня содержания  $O_2$ , химических процессов  
с участием соединений хлора и солнечной светимости

Уровень содержания $O_2$ по отношению к современному	Интегральная концентрация в столбе $O_3$ , $см^{-2}$	Высота, соответствующая максимуму концентрации $O_3$ , км	Максимальная концентрация $O_3$ , $см^{-3}$
1. Без учета химии соединений хлора; современное значение солнечной светимости			
1	9,93(18) *)	20,5	5,53(12)
$10^{-1}$	6,07(18)	19	4,57(12)
$10^{-2}$	2,47(18)	16	2,48(12)
$10^{-3}$	1,88(17)	11,5	1,92(11)
$10^{-4}$	5,58(15)	0	5,63(09)
2. С учетом химии соединений хлора; современное значение солнечной светимости			
1	9,70(18)	20,5	5,40(12)
$10^{-1}$	5,94(18)	19	4,62(12)
$10^{-2}$	1,59(18)	10	1,16(12)
$10^{-3}$	6,98(16)	9	5,72(10)
$10^{-4}$	5,18(15)	0	5,42(09)
3. С учетом химии соединений хлора; светимость Солнца составляет 70% от современного значения			
1	9,23(18)	20,5	5,12(12)
$10^{-1}$	5,77(18)	19	4,48(12)
$10^{-2}$	1,49(18)	10	1,04(12)
$10^{-3}$	6,73(16)	9	5,49(10)
$10^{-4}$	5,04(15)	0	4,71(9)

\*) 9,93(18) следует читать как  $9,93 \cdot 10^{18}$ .

склонения Солнца, основанные на методике Рандела [48], а Кэстинг и Донахью [26] использовали постоянное значение зенитного угла Солнца. Кэстинг и Донахью [26] отмечают, что рассчитанная ими интегральная концентрация в столбе  $O_3$  весьма чувствительна к выбору постоянного зенитного угла.

При содержании  $O_2$ , равном  $10^{-2}$  современного, примерно половина образующегося при реакции 39  $ClO$  превращается опять в  $Cl$  путем реакции 40; при этом в ходе процесса разрушаются

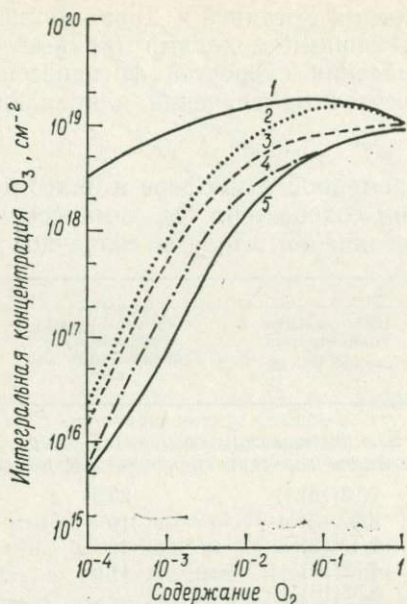


Рис. 5. Изменение интегральной концентрации в столбе  $O_3$  над поверхностью Земли при различных уровнях содержания  $O_2$  (по отношению к современному уровню) — сравнение результатов различных исследований (1 — зенитный угол Солнца  $57,3^\circ$  [46]; 2 — среднесуточные значения для широты  $30^\circ$ , склонение Солнца  $0^\circ$  [34]; 3 — зенитный угол Солнца  $45^\circ$  [26]; 4 — данная работа: без учета хлора, среднесуточные значения для широты  $30^\circ$ ; 5 — данная работа: с учетом хлора, среднесуточные значения для широты  $30^\circ$ , склонение Солнца  $0^\circ$ ).

дополнительно две молекулы кислорода. Нельзя пренебречь и потерями  $ClO$  вследствие выноса осадками (около 10%), что играет важную роль в определении асимптотического значения общего содержания хлора. Вследствие больших времен жизни молекул в химических процессах при данном содержании  $O_2$  важное значение в установлении профиля распределения  $ClO$  имеют эффекты переноса. При более высоких и более низких уровнях содержания  $O_2$  химические процессы вновь начинают преобладать в определении профиля  $ClO$ , но механизмы их воздействия различны. В случае более высоких уровней содержания  $O_2$  время жизни  $ClO$  в химических реакциях мало в связи с его взаимодействием с  $NO$  (реакция 41). Это связано с высокой концентрацией  $NO_x$  в тропосфере при данном содержании  $O_2$ . По мере снижения уровня содержания  $O_2$  уровень  $NO_x$  в тропосфере также снижается и оказывает на  $ClO$  незначительное влияние. В то же время значительно возрастает эффективность фотоллиза  $ClO$  (реакция J15) и тем самым эффективность разру-

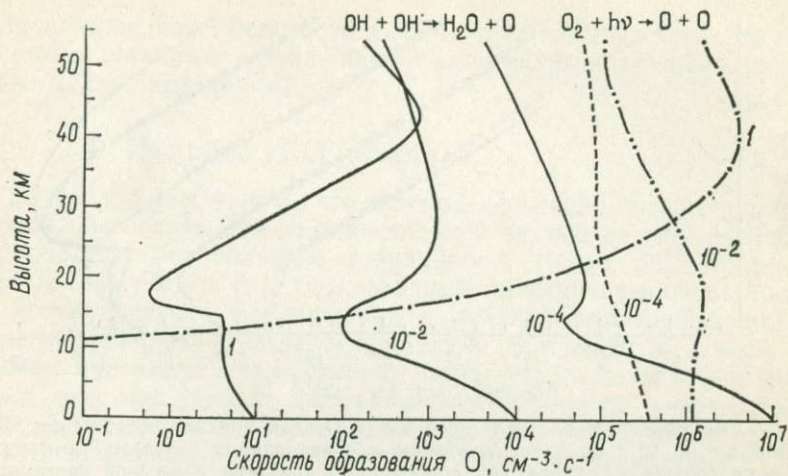
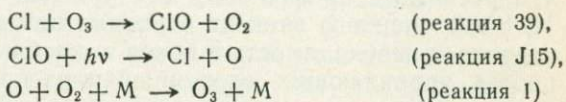


Рис. 6. Образование атомарного кислорода вследствие реакции  $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$  (реакция 19) и путем фотолиза  $\text{O}_2$  (реакция J1) в палеоатмосфере для различных уровней содержания  $\text{O}_2$ .

шения  $\text{O}_3$  частицами  $\text{Cl}$  понижается, так как в следующей последовательности реакций:



суммарная концентрация озона не изменяется. При содержании  $\text{O}_2$ , составляющем  $10^{-4}$  современного, практически весь  $\text{ClO}$ , образовавшийся в реакции 39, распадается вследствие фотолиза. К тому же из-за пониженной концентрации  $\text{O}_3$  преимущественного взаимодействия свободных атомов  $\text{Cl}$  с  $\text{O}_3$  не наблюдается, напротив, возрастает частота их взаимодействия с  $\text{HO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  (реакции 44 и 45) с образованием исходного  $\text{HCl}$ . За счет этих альтернативных реакций с участием атомов  $\text{Cl}$  распад  $\text{O}_3$  еще более замедляется; в этом и состоит главная причина уменьшения влияния  $\text{Cl}$  на  $\text{O}_3$  при низких уровнях содержания  $\text{O}_2$ .

Как отмечалось ранее, в палеоатмосфере, обедненной  $\text{O}_2$ , значимость процесса окисления  $\text{CH}_4$  как источника тропосферного  $\text{O}_3$  существенно снижена вследствие эффективного фотолитического распада  $\text{CH}_4$ . Кроме того, образование  $\text{OH}$  при фотолизе  $\text{H}_2\text{O}$  увеличивает значение механизмов с участием  $\text{HO}_x$ . Для уровня содержания  $\text{O}_2$ , составляющего  $10^{-4}$  современного, реакции с участием  $\text{HO}_x$  преобладают во всей атмосфере. Для этого уровня важным источником атомов  $\text{O}$  становится реакция 19, в особенности на высотах менее 10 км. На рис. 6 показано

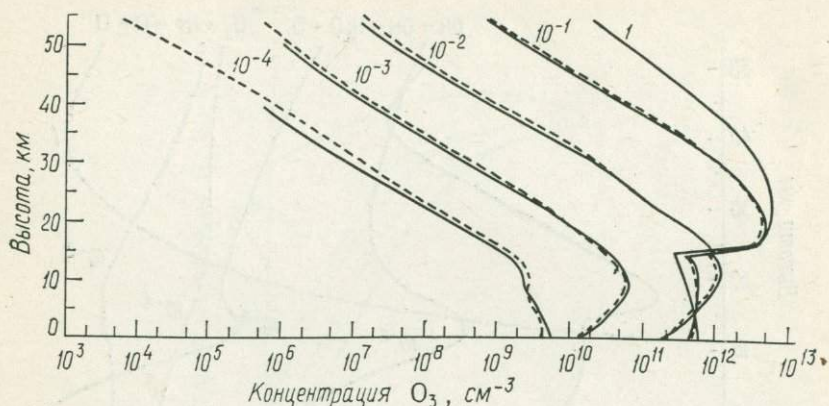


Рис. 7. Вертикальное распределение озона  $O_3$  для уровней содержания  $O_2$  в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 по отношению к современному с учетом химических реакций соединений хлора при современном значении солнечной светимости (сплошная линия) и при солнечной светимости, составляющей 70 % от современного значения (пунктирная линия).

сравнение образования атомов  $O$  вследствие реакции 19 и путем фотолиза  $O_2$  в палеотропосфере с содержанием  $O_2$ , составляющим  $10^{-4}$  современного. Анализ этих данных показывает, что расчетные профили  $O_3$  для уровней содержания  $O_2$  ниже  $10^{-3}$  современного зависят от принятого распределения  $H_2O$ , и возникает необходимость в более подробных исследованиях процессов, управляющих эволюцией и распределением  $H_2O$  в палеотропосфере.

Как отмечали Джонстон и Подолске [25], основные потери  $O_3$  вследствие химических процессов в современной тропосфере связаны с реакциями  $HO_x$ , в особенности с теми циклами, скорость-определяющие стадии которых заданы реакциями 22 и 23. Скорости этих реакций быстро возрастают при понижении уровня содержания  $O_2$ . Следует, однако, заметить, что, хотя концентрации  $OH$  и  $HO_2$  (посредством реакций 15 и 14) заметно возрастают за счет фотолиза  $H_2O$ , они быстро рекомбинируют (реакция 22), вновь образуя  $H_2O$ . Поэтому эффект реакций 22 и 23 представляет собой разность скоростей образования  $OH$  и  $HO_2$  при фотолизе  $H_2O$  и их рекомбинации с образованием исходной  $H_2O$ .

Астрофизические исследования позволяют предполагать, что светимость Солнца на протяжении 4,5 млрд. лет его эволюции возрастала приблизительно от 70 до 100 % ее современного значения [50]. Для учета влияния пониженной светимости Солнца на уровень содержания  $O_3$  в палеоатмосфере мы провели расчеты нашей стандартной модели для светимости, составляющей 70 % современного значения. Результаты расчетов

для пониженной светимости Солнца показаны на рис. 7 пунктирными линиями в сравнении с нашими стандартными расчетами (сплошные линии).

#### 4. Привнос $H_2O$ кометами

В разд. 1 отмечалось, что гипотеза, согласно которой кометы могли обеспечить Землю значительной частью летучих веществ, приобретает все большую популярность [9, 13, 55]. По представлениям Чанга [9],  $H_2O$ , главный летучий компонент комет и другие летучие, заключенные в ледяной кометной матрице, быстро испаряются и непосредственно поступают в атмосферу Земли при входе в нее кометы. Чтобы учесть воздействие притока кометной  $H_2O$  на фотохимические процессы в палеоатмосфере, мы приняли определенное значение нисходящего потока  $H_2O$  в атмосферу в качестве верхнего граничного условия. В наших расчетах были приняты два значения потока  $H_2O$ . В случае максимального потока мы, вслед за Чангом [9], принимали, что вся находящаяся ныне в океанах  $H_2O$  является результатом притока  $H_2O$  с кометами. Для расчетов с другим значением потока  $H_2O$  мы принимали, что кометное происхождение имеют 10 % воды, находящейся в океанах. По предположению Везерилла [54], основной период кометной бомбардировки приходится на первые 600 млн. лет истории Земли. В наших вычислениях принималось, что период интенсивной кометной бомбардировки приходился на первый миллиард лет истории Земли. Если использовать такое значение периода времени, максимальный вклад кометной  $H_2O$  соответствует притоку, равному  $3,5 \cdot 10^{11}$  молекул  $H_2O$  на  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ , а вклад 10 % соответствует притоку  $3,5 \cdot 10^{10}$  молекул  $H_2O$  на  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ .

Для учета влияния этих потоков  $H_2O$  на фотохимические процессы в палеоатмосфере и, в частности, на распределение  $O_3$  нам необходимо знать вертикальное распределение  $O_2$  в добиологической палеоатмосфере (отвечающей первому миллиарду лет истории Земли). В добиологической палеоатмосфере источником  $O_2$  служил фотолит  $H_2O$ , сопровождающийся уткойой Н из атмосферы. Недавно Кэстинг и др. [27] исследовали вертикальное распределение  $O_2$  в добиологической палеоатмосфере. Они нашли, что у поверхности уровень содержания  $O_2$  составлял  $\sim 10^{-12}$  современного, а максимальный уровень  $\sim 10^{-6}$  современного соответствовал высоте около 40 км. В наших расчетах  $O_3$  в добиологической палеоатмосфере мы использовали добиологические профили распределения  $O_2$ , приведенные Кэстингом и др. [27]. Вычисленный нами профиль  $O_3$  в добиологической палеоатмосфере показан на рис. 8. На этом рисунке также показаны профили  $O_3$  для двух случаев притока

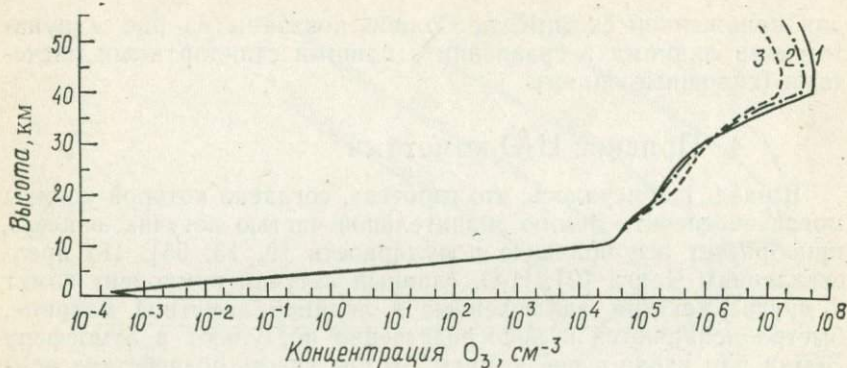


Рис. 8. Вертикальное распределение озона  $O_3$  в добиологической палеоатмосфере при содержании  $O_2$ , составляющем  $10^{-12}$  современного уровня у поверхности [27], в отсутствие притока  $H_2O$  за счет комет (кривая 1) и при притоке, равном  $3,5 \cdot 10^{10}$  (кривая 2) и  $3,5 \cdot 10^{11}$   $см^{-2} \cdot с^{-1}$  (кривая 3).

воды с кометами. Как видно на рис. 8, приток  $H_2O$  с кометами должен был оказывать пренебрежимо малое влияние на фотохимические процессы  $O_3$  в добиологической палеоатмосфере.

Далее мы рассмотрим влияние притока  $H_2O$  с кометами на распределение  $H_2O$  в добиологической палеоатмосфере. Как и следовало ожидать, приток кометной  $H_2O$  приводит к значительно повышенному содержанию  $H_2O$  в верхних слоях атмосферы. На высоте 50 км доля  $H_2O$  возрастает от примерно  $10^{-2}$  частей на миллион до более чем  $10^2$  частей на миллион — на четыре порядка! В недавнем исследовании Мак-Кея и Томаса [41], рассмотрены последствия встречи Земли с плотными межзвездными облаками водорода. Число таких встреч в истории Земли по оценкам составляет около 16. Мак-Кей и Томас нашли, что встреча с плотным межзвездным облаком водорода приводит к нисходящему потоку  $H_2O$  в современной атмосфере примерно в  $7 \cdot 10^9$  молекул  $H_2O$  на  $1 см^2 \cdot с$  в течение приблизительно  $10^5$  лет. Такой приток  $H_2O$  по порядку величины совпадает с принятым нами притоком  $H_2O$  в палеоатмосферу за счет комет. В модели Мак-Кея и Томаса такой приток  $H_2O$  также приводил к уровням содержания  $H_2O$  в верхних слоях атмосферы, приблизительно равным  $10^2$  частей на миллион. Мак-Кей и Томас нашли, что такие уровни содержания  $H_2O$  в верхних слоях современной атмосферы соответствуют давлению, превышающему давление насыщенного пара  $H_2O$ , что свидетельствует о возможности образования в верхних слоях атмосферы облаков из кристаллов льда. Мы полагаем, что образование такого рода ледяных облаков еще более вероятно в па-

леоатмосфере, поскольку температура верхних слоев палеоатмосферы из-за отсутствия стратосферного озонового слоя с присущими ему свойствами поглощения и нагрева могла быть на целых 60 К ниже, чем для современной атмосферы [32].

Проведенные нами предварительные расчеты приводят к предположению, что основным эффектом гипотетического притока  $H_2O$  за счет комет могло быть образование в верхних слоях атмосферы облачного слоя из кристаллов льда, который мог существовать в течение всего периода интенсивной кометной бомбардировки. Возникает ряд интересных вопросов, связанных с существованием такого облачного слоя и его последствиями. Каковы были оптические свойства такого рода облака? Мог ли этот облачный слой послужить защитой земной поверхности от смертоносного ультрафиолетового излучения Солнца до образования озонового слоя? Как долго могли такие облака существовать в палеоатмосфере? Какое влияние могли оказать эти облака на климатические свойства системы ранняя Земля — атмосфера? Для ответа на эти вопросы требуется подробное изучение оптических и излучательных свойств подобных облаков, что выходит за рамки настоящего исследования.

## Литература

1. *Ackermann M.* In: *G. Fiocco* (editor), *Mesospheric Models and Related Experiments*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 149—159, 1971.
2. *Berkner L. V., Marshall C. L.* *Journal of the Atmospheric Sciences*, **22**, 225, 1965.
3. *Blake A. J., Carver H. J.* *Journal of the Atmospheric Sciences*, **34**, 720, 1977.
4. *Boughner R. E., Nealy J. E.* *National Aeronautics and Space Administration Technical Paper 1418*, 1979, p. 45.
5. *Buat-Menard P., Chesselet R. C.* *R. Academy of Science Paris*, **272**, 1330, 1971.
6. *Cadle R. D.* *Review of Geophysics and Space Physics*, **18**, 746, 1980.
7. *Chameides W. L.* In: *Man's impact on the troposphere*/Ed. by *J. S. Levine D. R. Schryer*. NASA Reference Publication, **1022**, 81—108, 1978.
8. *Chamedies W. L., Levine J. S.* *Proceedings of the 6th International Conference on Atmospheric Electricity*, Manchester, England, 1980.
9. *Chang S.* In: *Space Missions to Comets*/Ed. by *M. Neugebauer, D. K. Yeomens, J.C. Brandt, R. W. Hobbs*. NASA Conference Publication, **2089**, 59—112, 1979.
10. *Chesselet R., Morelli J., Buat-Menard P.* In: *The Changing Chemistry of the Oceans*/Ed. by *D. Dyrssen, D. Jagner*. Wiley, New York, 93—114, 1972.
11. *Cicerone R. S., Stedman D. H., Stolarski R. S.* *Geophysical Research Letters*, **2**, 219, 1975.
12. *Crutzen P. J., Isaksen I. S., McAfee J. R.* *Journal of Geophysical Research*, **83**, 345, 1978.
13. *Delsemme A. H.* In: *Space Missions to Comets*/Ed. by *M. Neugebauer, D. K. Yeomens, J. C. Brandt, R. W. Hobbs*. NASA Conference Publication, **2089**, 139—178, 1979.

14. DeMore W. B., Stier L. J., Kaufman D. F., Golden D. M., Hampson R. F., Kurylo M. J., Margitan J. J., Molina M. J., Watson R. T. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Stratospheric Models. JPL Publication 79—27, Jet Propulsion Laboratory, 1979.
15. Duce R. A. Journal of Geophysical Research, **74**, 4597, 1969.
16. Ericksson E. Tellus, **7**, 388, 1955.
17. Ericksson E. Tellus, **12**, 63, 1960.
18. Fanale F. P. Icarus, **28**, 179, 1976.
19. Fishman I., Solomon S., Crutzen P. J. Tellus, **31**, 432, 1979.
20. Hampson R. F., Carvin D. Reaction Rate and Photochemical Data for Atmospheric Chemistry — 1977. NBS Special Publication 513, National Bureau of Standards, 1978.
21. Hessvedt E., Henriksen S. E., Hjartarson H. Geophysica Norvegica, **31**, 1, 1974.
22. Hoyle F., Wickramasinghe N. C. Lifecloud — The Origin of Life in the Universe. New York, Harper and Row 1978, 189 p.
23. Hudson R. D., Mahle S. H. Journal of Geophysical Research, **77**, 2902, 1972.
24. Hudson R. D., Reed E. I., editors. The Stratosphere, Present and Future. NASA Reference Publication 1049, 1979, 432 p.
25. Johnston H. S., Podolske J. Reviews of Geophysics and Space Physics **16**, 491, 1978.
26. Kasting J. F., Donahue T. M. Journal of Geophysical Research, **85**, 3255, 1980.
27. Kasting J. F., Liu S. C., Donahue T. M. Journal of Geophysical Research, **84**, 3097, 1979.
28. Katsumori M. Journal of the Meteorological Society of Japan, **57**, 243, 1979.
29. Levine J. S. Icarus, **28**, 165, 1976.
30. Levine J. S. In: Comparative Planetology/Ed. by C. Ponnamperna. New York, Academic Press, 165—182, 1978.
31. Levine J. S. Origins of Life, **10**, 4, 1980.
32. Levine J. S., Boughner R. E. Icarus, **39**, 310, 1979.
33. Levine J. S., Boughner R. E., Smith R. A. Origins of Life, **10**, 199, 1980.
34. Levine J. S., Hays P. B., Walker J. C. G. Icarus, **39**, 295, 1979.
35. Levine J. S., Hughes R. E., Chamedies W. L., Howell W. E. Geophysical Research Letters, **6**, 557, 1979.
36. Levine J. S., Rogowski R. S., Gregory G. L., Howell W. E., Fishman F. J. Geophysical Research Letters, **8**, 1981.
37. Levine J. S., Schryer D. R. (editors). Man's Impact on the Troposphere. NASA Reference Publication № 1022, 1978, p. 376.
38. MacDonald G. A. Volcanoes., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 42—54, 323—329, 1972.
39. Martens C. S., Wesolowski J. J., Harris R. C., Kaifer R. Journal of Geophysical Research, **78**, 8778, 1973.
40. McElroy M. B., Wojsy S. C., Penner J. E., McConnell J. C. Journal of the Atmospheric Sciences, **31**, 287, 1974.
41. McKay C. P., Thomas G. E. Geophysical Research Letters, **5**, 215, 1978.
42. Natarajan M. Doctoral Dissertation, State University of New York at Stony Brook, 1976.
43. Oro J. Nature, **190**, 389, 1961.
44. Owen T. Icarus, **28**, 171, 1976.
45. Ramanathan V. Journal of Atmospheric Sciences, **33**, 1330, 1976.
46. Ratner M. I., Walker J. C. G. Journal of the Atmospheric Sciences, **29**, 803, 1972.
47. Robbins R. C., Cadle R. D. Eckhardt. Journal of Meteorology, **16**, 53, 1959.
48. Rundel D. R. Journal of the Atmospheric Sciences, **34**, 639, 1977.
49. Ryan J. A., Mukherjee N. R. Reviews in Geophysics and Space Physics, **13**, 650, 1975.

50. *Sagan C., Mullen G. Science*, **177**, 52, 1972.
51. *Walker J. C. G. Journal of the Atmospheric Sciences*, **32**, 1248, 1975.
52. *Walker J. C. G. Evolution of the Atmosphere*. MacMillan Publishing Company, New York, 1977, p. 318.
53. *Walker J. C. G. In: Comparative Planetology*/Ed. by *C. Ponnamperna*, Academic Press, New York, 141—164, 1978.
54. *Wetherill G. W. Proceedings Lunar Science Conference*, **6**, 1539, 1975.
55. *Whipple F. In: Space Missions to Comets*/Ed. by *M. Neugebauer, D. K. Yeomans, J. C. Brandt, R. W. Hobbs*. NASA Conference Publication 2089, 1—32, 1979.
56. *Yung Y. L., McElroy M. B., Wojsy S. C. Geophysical Research Letters*, **9**, 397, 1975.

## Кометное вещество и происхождение жизни на Земле

А. Ласкано-Араухо<sup>1)</sup>, Дж. Оро<sup>2)</sup>

Среди малых тел Солнечной системы кометы в наибольшей степени сохранили свое первичное состояние. За исключением фосфора, все органогенные элементы (Н, С, N, О, S), необходимые живым организмам, обнаружены в составе комет. Путем сравнения содержания углерода в кометах и углистых хондритах была получена оценка, согласно которой не менее 10 % вещества комет представляют собой органические соединения. Природа обнаруженных в кометах химических соединений позволяет предположить, что порождающие их молекулы по крайней мере сравнимы по сложности с молекулами межзвездного пространства.

Вероятные источники и пути возникновения органических молекул комет таковы: 1) первичная солнечная туманность, которая должна была служить первоначальным источником всех органических и неорганических соединений в кометах; 2) органические молекулы, образовавшиеся под действием ионизирующего излучения при распаде  $^{26}\text{Al}$  и других короткоживущих изотопов досолнечного происхождения в ходе ранних стадий дифференциации солнечной туманности; 3) органические соединения, образовавшиеся в результате нагрева вещества в облаке Эпика — Оорта космическими лучами за время его существования; 4) более сложные органические соединения, образовавшиеся в поверхностных ледяных слоях кометных ядер под действием солнечного ветра, УФ-излучения и в ходе экзотермических реакций, индуцируемых при достижении кометой перигелия.

Реакционная способность ряда химических соединений, определяемых в кометах (Н, ОН,  $\text{NH}_2$ , СО, CS,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$ , HCN,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), указывает на возможность присутствия в ядрах комет ряда биохимических соединений, таких, как аминокислоты, пурины, пиримидины и т. д. Однако из-за малой массы ( $\sim 10^{18}$  г), низких температур ( $< 200$  К) и других внешних условий, таких, как отсутствие атмосферы, гидросферы и лито-

<sup>1)</sup> Астрономический институт Автономного университета Мехико, Мехико 20, Мексика.

<sup>2)</sup> Факультет биофизических наук и химии, Хьюстонский университет, Хьюстон, шт. Техас 77004, США.

сферы, имеющих на Земле, маловероятно, что процессы органического синтеза в кометах прошли дальше, чем до стадии химической эволюции органического вещества, свойственной углистым хондритам.

Хотя весьма маловероятно, что на кометах могла появиться жизнь, древний возраст земной жизни, о котором свидетельствует наличие сложных микронскопаемых биологической природы возрастом примерно 3,5 млрд. лет, заставляет считать, что жизнь возникла на Земле в тот период, когда приток кометного вещества был значительно сильнее, чем в настоящее время. По различным оценкам, аккреция кометных ядер доставила на Землю около  $10^{22}$  г углерода в ходе ранней стадии ее эволюции. Вероятно, большая часть углеродистых соединений в кометах распадалась с образованием весьма реакционноспособных фрагментов под действием высоких температур и ударных волн, возникавших при аккреции. Тем самым на короткое время создавались атмосферные условия, имеющие относительно восстановительный характер, в которых вследствие «закалки» и рекомбинации реакционноспособных молекулярных форм протекал абиогенный органический синтез. Более того, попадая на земную поверхность, некоторые из этих соединений могли вступать в различные реакции конденсации и давать начало образованию более сложных биохимических мономеров и полимеров, существенных для живых организмов. Поэтому мы можем прийти к заключению, что кометы внесли значительный вклад в процессы химической эволюции, необходимые для возникновения жизни на Земле.

## Введение

Проблема роли кометного вещества в предбиологической эволюции является лишь частью более общей проблемы эволюции органических соединений в космосе и в конечном счете возникновения жизни во Вселенной.

Хотя о существовании органических молекул внеземной природы известно с тех пор, как анализы, проведенные усилиями Берцелиуса, Бергто, Велера и других химиков XIX века, показали наличие углеводов в углистых хондритах (ср. [87]), современный прогресс радиоастрономии и других методов изучения космоса дал возможность продемонстрировать наличие богатого набора относительно сложных органических молекул в плотных межзвездных молекулярных облаках, кометах, углистых хондритах (и, вероятно, в породивших эти метеориты телах), а также в атмосферах планет-гигантов и некоторых из их спутников (ср. [99]). Все эти открытия вновь придали силу гипотезе органической космохимии [96, 97] и подтвердили пред-

положение Бернала [16], что первичный органический синтез, который, согласно Опарину [90—94] и Холдейну [49], предшествовал появлению жизни, мог протекать еще до образования самой Земли.

Но играют ли внеземные органические молекулы какую-либо существенную роль в появлении жизни на Земле? Хотя крайне маловероятно, чтобы жизнь могла эволюционировать в галактических молекулярных облаках или ядрах комет, в согласии с недавно высказанным предположением последние открытия сложных микроскопаемых возрастом  $\sim 3,5$  млрд. лет в западной Австралии [8] показали, что жизнь на Земле должна была появиться в то время, когда приток кометного и сходного метеоритного вещества был значительно выше его современного уровня. Поэтому логично сделать вывод, что кометы могли играть определенную роль в формировании условий окружающей среды на Земле до возникновения на ней жизни.

Цель данной статьи — дать критический обзор этой возможности. Сначала будут исследованы пути органического синтеза, происходящего в плотных межзвездных облаках в нашей Галактике и кометах, а также возможность существования в этих условиях более сложных органических молекул, чем до сих пор обнаруженные. Затем будут рассмотрены различные оценки количества летучих на Земле, имеющих возможную кометную природу, и проведено сравнение с другими внеземными источниками органогенных элементов. Мы обсудим также важные с точки зрения возникновения жизни события, которые могли сопровождать столкновения кометных ядер с Землей при их аккреции на первичную Землю. Наконец, будут обсуждены некоторые из современных идей о предбиологическом органическом синтезе биохимических мономеров и их полимеров на первичной Земле, а также возникновение предклеточных систем и их дальнейшая эволюция, которая привела к появлению земной жизни.

## Межзвездные органические соединения

Хотя давно известно, что в атмосфере холодных звезд [141] и в межзвездном пространстве [2] присутствуют простые двухатомные соединения ( $C_2$ , CN, CH, CO), только в последние 15 лет развитие радиоастрономической техники привело к открытию большого числа главным образом органических молекул в газово-пылевых облаках Млечного Пути и других галактик (табл. 1). Тем самым нашли подтверждение предыдущие предположения об универсальности органической химии [95, 96, 137]. Обсуждение распределения межзвездных молекул, а так-

же механизмов, ответственных за их образование и распад, можно найти в литературе [133].

В высшей степени примечательно, что среди отождествленных межзвездных соединений обнаружены именно те, которые использовались либо образовывались в лабораторных экспериментах по имитации предбиологического органического синтеза.

Таблица 1

## Молекулы в межзвездной среде

2 атома	$H_2$ , OH, $CH^+$ , CH, CO, CN, CS, NO, $C_2$ , SO, NS, SiO, SiS
3 атома	$HCO^+$ , $N_2H^+$ , $H_2O$ , HCN, HNC, CCH, HCO, HNO, OCS, $H_2S$ , $SO_2$
4 атома	$NH_3$ , $H_2CO$ , $HC_2H$ , $C_3N$ , HNCO, $H_2CS$ , HNCS
5 атомов	$CH_4$ , $C_4H$ , $HC_3N$ , $H_2CCO$ , $NH_2CN$ , $CH_2NH$ , HCOOH
6 атомов	$CH_3CN$ , $NH_2CHO$ , $CH_3OH$ , $CH_3SH$
7 атомов	$CH_3CCH$ , $CH_3CHO$ , $NH_2CH_3$ , $CH_2CHCN$ , $HC_5N$
8 атомов	$HCOOCH_3$
9 атомов	$CH_3CH_2OH$ , $CH_3CH_2CN$ , $CH_3OCH_3$ , $HC_7N$
10 атомов	нет
11 атомов	$HC_9N$

Действительно, девять видов молекул межзвездного пространства (молекулярный водород, вода, аммиак, моноокись углерода, тиоформальдегид, альдегиды, цианистый водород, цианоацетилен и цианамид, плюс фосфин, обнаруженный только в атмосфере Юпитера, но, вероятно, присутствующий и в межзвездном пространстве) можно рассматривать как предшественники практически всех биохимических соединений, присутствующих в живых системах (табл. 2) [100, 102].

Однако на ноябрь 1980 г. не поступало сообщений о каких-либо межзвездных биохимических мономерах. Поиск в межзвездном пространстве гетероциклических углеродсодержащих молекул, таких, как фуран и имидазол [31], пурины и пиримидины [125], не дал положительных результатов, а Донн и Ханна [34] не нашли экспериментального подтверждения утверждению Джонсона [66, 67], что диффузные полосы поглощения в видимой области межзвездного спектра являются полосами типа Соре, проявляемыми сложным металлопорфирином, бис-пиридил-магний-тетрабензпорфином ( $MgC_{46}N_8O_6$ ). Глицин, простейшую аминокислоту, основной продукт абиогенного синтеза и наиболее распространенную аминокислоту в метеоритах [83, 116], безуспешно искали в девяти галактических молекулярных облаках, включая Стрелец В2 и Орион А [19], хотя недавно Холлисом и др. [57] в Стрельце В2 была найдена синглетная линия эмиссии с частотой 84,22 ГГц, совпадающая с переходом в конформерах глицина с низшей энергией.

Следует, однако, заметить, что в диапазоне длин волн 3—6 мм в двух молекулярных облаках в созвездиях Ориона и Стрельца наблюдается более 130 неотожествленных эмиссионных линий [132]. Возможно, что некоторые из этих линий могут соответствовать органическим молекулам с более сложной структурой, чем у приведенных в табл. 1. Эта возможность подтверждается не только теоретическим анализом существования полимеров в межзвездном пространстве [41, 119, 149, 150], но

Таблица 2

Биохимические мономеры  
на основе молекул межзвездной среды  
и их свойства

Молекулы межзвездной среды	Формулы	Биохимические мономеры и свойства
1. Водород	$H_2$	Восстанавливающий агент, протонирование
2. Вода	$H_2O$	Универсальный растворитель, гидроксиглирование
3. Аммиак	$NH_3$	Основной катализ, аминирование
4. Окись углерода	$CO(H_2)$	Углеводороды и кислоты
5. { Формальдегид	$CH_2O$	Моносахариды (рибоза) и глицерин
{ Ацетальдегид	$CH_3CHO$	Дезоксирибозы (дезоксирибоза)
{ Альдегиды	$RCHO$	Аминокислоты
6. Тиоформальдегид	$CH_2S$	Цистеин и метионин
7. Цианистый водород	$HCN$	Пурины (аденин, гуанин) и аминокислоты
8. Цианоацетилен	$HC_3N$	Пиримидины (цитозин, урацил, тимин)
9. Цианамид	$H_2NCN$	Полипептиды, полинуклеотиды и липиды
10. Фосфин (на Юпитере)	$PH_3$	Фосфаты и полифосфаты

и рядом лабораторных имитационных экспериментов, в которых льдоподобные смеси, содержащие простые молекулы ( $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$  и т. д.), облучались УФ-фотонами [6, 44, 45] и ионизирующим излучением (табл. 3). В этих экспериментах был получен нелетучий органический материал, включая аминокислоты, пурины и пиримидины, и низкомолекулярные углеводороды. Таким образом, возникает предположение, что эти виды соединений могут являться компонентами межзвездных пылевых частиц.

Недавно Хойл и Викрамасингх [59—61] высказали предположение, что особенности поглощения межзвездного вещества в ультрафиолетовой области ( $\lambda < 1900 \text{ \AA}$  и в полосе длин волн 1900—2800  $\text{\AA}$ ) и особенность экстинкции при 3 мкм у галактических инфракрасных источников связаны с наличием большой

массы ( $\sim 10^{40}$  г) замороженных бактерий, водорослей и вирусных частиц. Однако крайне затруднительно представить себе какие-либо возможные механизмы возникновения, выживания и эволюции таких гипотетических организмов в суровых условиях межзвездной среды. Действительно, поскольку Хойл и Викрамасингх утверждают, что жизнедеятельность этих межзвездных клеток основана на химических превращениях углерода, для них должны быть свойственны те же ограничения со стороны условий окружающей среды, что и для земной жизни, которая не может переносить низких плотностей ( $\rho \leq 10^6$  молекул  $H_2$  на  $1 \text{ см}^3$ ), низких температур ( $10 \leq T \leq 100 \text{ K}$ ), высокого уровня радиации ( $F = 1,0 \cdot 10^{10}$  частиц/ $\text{см}^3$  с типичной энергией  $E \geq 100 \text{ МэВ/нуклон}$ ) и недостатка воды. Именно такие условия преобладают даже в самых плотных молекулярных облаках и, по-видимому, исключают существование межзвездной флоры [74, 100, 104, 112, 121].

Наличие органических молекул в солнечной туманности определяется не только замечательной корреляцией между спектрами комет и молекулярным составом плотных межзвездных облаков, но и большим набором аминокислот, карбоновых кислот, пуринов, пиримидинов и углеводов, найденных в углистых хондритах [87, 99]. Наличие этих продуктов пиролиза и конденсации некоторых соединений, обнаруженных в межзвездном пространстве, свидетельствуют о том, что их предшественники составляли часть того материала, из которого сформировались планеты и родительские тела метеоритов. Однако жесткие условия, преобладавшие в ходе образования и аккумуляции планет земного типа, привели к разрушению большинства соединений, присутствовавших в солнечной туманности, и тем самым исключили возможность прямой взаимосвязи между органическими соединениями межзвездного пространства и жизнью на Земле.

### Химическая эволюция в ядрах комет

Кометы — тела относительно малых размеров, не более нескольких десятков километров в диаметре, и небольшой массы — в диапазоне от примерно  $10^{15}$  до  $10^{18}$  г. Известно, что они состоят главным образом из льдов ( $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$  и т. д.) и клатратов простых соединений. Сравнивая кометы с углистыми хондритами типа CI, которые, видимо, представляют собой наиболее древние метеориты, Дельземм [28] показал, что степень обеднения комет H, C, N и O в несколько раз меньше, чем у этих метеоритов. Итак, если исключить водород, содержание которого составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  от его содержания на Солнце, кометы, очевидно, относительно сходны с первичной солнечной

туманностью и поэтому могут рассматриваться как тела Солнечной системы, наиболее сохранившие исходное состояние [28]. Наблюдения спектров комет позволили надежно установить присутствие в них ряда органических молекул и радикалов ( $C_2$ , C, CH, CN, CO, CS, HCN,  $CH_3CN$ ), а также других простых химических соединений ( $NH$ ,  $NH_3$ , OH,  $H_2O$ ); все эти соединения отождествлены также и в межзвездной среде (табл. 1), хотя попытки отождествления с помощью микроволновой и инфракрасной техники более сложных органических молекул, таких, как  $CH_2CO$ ,  $CH_3OH$ ,  $CN-CH_2-CN$ ,  $CH \equiv C-CN$ , которые, как можно ожидать, присутствуют в ядрах комет, оказались неудачными [29, 126].

В дополнение к летучим компонентам важными компонентами ядер являются, как известно, термически устойчивые элементы (Na, K, Cr, Mn, Fe) и силикатные частицы. Как показал Дельземм [28], из отношения газа к пыли для комет Беннета (1970 II) и Аренда — Ролана (1957 III) следует, что в веществе, выбрасываемом кометой, пыль и газ присутствуют в сравнимых количествах. Это заставляет думать, что значительная доля массы ядра может состоять из нелетучего каменистого и пылеобразного материала. Присутствие этого термоустойчивого компонента позволяет предполагать родство некоторых обогащенных летучими соединениями метеоритов и комет. Такая возможность подкрепляется тем, что частицы Браунли [20, 21], которые могут иметь кометное происхождение, вероятно, имеют природу хондритов типа CI и CM. Однако следует подчеркнуть, что сравнение и определение орбит для хондритов Прибрам, Лост-Сити и Иннисфри [87] подтверждает астероидное происхождение этих объектов.

Существует несколько возможных источников органических соединений на кометах, которые, согласно Каймакову и Матвееву [71] могут составлять до 5 % массы ядра. Эти источники включают сложные органические молекулы, доставшиеся по наследству от солнечной туманности [42—44], образование биологически важных макромолекул в ранний период под действием распада  $^{26}Al$  и других изотопов досолнечной природы [64, 65] и нагревание вещества комет в облаке Эпика — Оорта космическими лучами [33], которое, как показано, ведет к образованию углеводородов и других органических соединений [85]. Далее, твердофазные эксперименты (рис. 1), в которых льдоподобные смеси относительно простых соединений ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $H_2CO$ ) облучали электронами, протонами и ионами высоких энергий, свидетельствуют об образовании значительных количеств нелетучих органических соединений, включая биохимические мономеры, такие, как аминокислоты, пу-

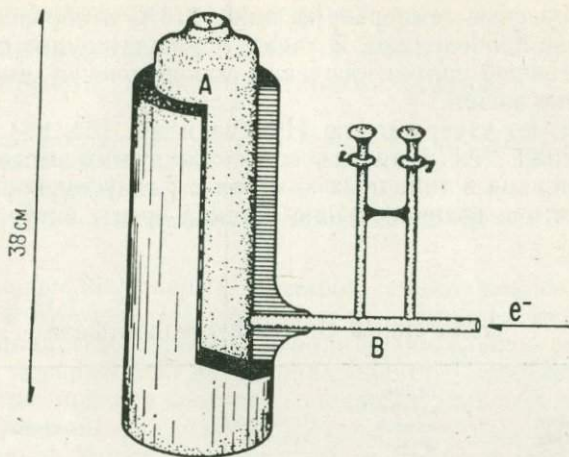


Рис. 1. Эксперимент по облучению твердой фазы. Смесь аммиака, воды и метана, помеченного  $^{14}\text{C}$ , подается при комнатной температуре через трубку *B*. Когда в сосуд *A* поступает жидкий азот, реагенты конденсируются в виде твердого слоя в месте контакта *A* и *B*. Затем проводится облучение электронами высоких энергий (5 МэВ) (из [96, 97], с некоторыми изменениями).

рины, пиримидины и карбоновые кислоты (табл. 3). Таким образом, эти эксперименты подтверждают возможность протекания подобных реакций в льдистых поверхностных слоях кометных ядер под действием солнечного ветра, УФ-радиации и экзотермических реакций, индуцируемых при достижении кометами перигелия.

Однако, поскольку при каждом прохождении кометой перигелия с поверхности ядра удаляется большой слой кометного льда, вполне вероятно, что большая часть органических продуктов на поверхности возгоняется, «сдувается» или полимеризуется [12]. Поэтому маловероятно, что эти органические соединения или их производные могли испытывать дальнейшую химическую эволюцию в периодически возникающих на кометах условиях жидкой среды, которая, по предположению Хойла и Викрамасингха [58], и является местом возникновения жизни, в том числе вирусов. Действительно, как показали Каймаков и Шарков [70], на расстоянии 1 а. е. от Солнца равновесная температура льда  $\text{H}_2\text{O}$  составляет около  $-75^\circ\text{C}$  и существование жидкой воды невозможно. Этот вывод подтвердился далее в ряде экспериментов, в которых при облучении  $\text{D}_2\text{O}$  [39],  $\text{H}_2\text{O}$  [69] и замороженных растворов с включениями металлов,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , солей, карбамида и фенилаланина [32] достига-

лись равновесные температуры ниже 213°C и образования жидкой воды не происходило. В таких условиях трудно представить себе абиогенный синтез ключевых макромолекул живых систем и появление жизни.

Однако, по утверждению Ирвина и др. [64, 65] и Уоллиса [142], распад  $^{26}\text{Al}$  и других короткоживущих изотопов досолнечной природы в типичных кометах с радиусом порядка 10 км мог привести к возникновению жидкой среды внутри кометных

Таблица 3

## Абиогенный синтез в твердой фазе

Исходные вещества	Температура ледяной смеси, К	Источник энергии	Продукты	Литература
$\text{CH}_4\text{—N}_2\text{—C}_2\text{H}_6$	20	Электроны	Ацетилен, этилен, 1,3-бутадиен, $\text{H}_2$ , пропилен, пропан, бутилены	[38]
$\text{CH}_4\text{—N}_2$	20	Электроны	Ацетилен, этилен	[38]
$\text{CH}_4\text{—NH}_3\text{—H}_2\text{O}$	77	Протоны (12 МэВ)	Ацетон, мочевины, ацетамид	[15]
$\text{CH}_4\text{—NH}_3\text{—H}_2\text{O}$	77	Электроны (5 МэВ)	Глицин, глицинамид, аланин, аспарагиновая кислота, пурины, пиримидины	[97]
$\text{HCHO—NH}_3\text{—H}_2\text{O}$	77	Ионы $^{14}\text{C}^+$ (5 МэВ)	Глицин, аланин, щавелевая кислота, гликолевая кислота, формамидин, CN, трет-бутанол, н-пропиловый спирт	[75]

ядер и ее сохранению по крайней мере в течение первых  $10^7$  лет истории Солнечной системы. В кратковременные периоды существования таких условий, возможных только при значениях времени аккреции порядка  $10^6$  лет, мог протекать химический органический синтез, индуцированный радиацией [64, 65]. Правда, воздействие радиации на самовоспроизводящиеся системы, возникающие при этих условиях, одновременно должно вызывать гибель любых форм жизни, которые могли бы появиться [12]. Поэтому можно сделать вывод, что отсутствие соответствующей атмосферы, гидросферы и литосферы и низкие температуры ( $<200$  К) исключали появление жизни на кометах, где маловероятно протекание процессов абиогенного органического синтеза за пределы стадии химической эволюции органического вещества в углистых хондритах.

## Столкновения с кометами и природные условия на Земле в период до возникновения жизни

Часто увидишь, как звезды — лишь ветер задул — с небосклона  
Вдруг упадают стремглав, и как сквозь суморок ночи  
Пламя у них за спиной, белея, тянется длинно...

*Вергилий. Георгики (Стих 305—307)<sup>1)</sup>*

Большое число ударных кратеров, обнаруженное на Луне, Меркурии и Марсе [123] говорит о том, что процессы соударений с межпланетными телами играли значительную роль в формировании поверхностей внутренних планет Солнечной системы. Эта гипотеза подтверждается недавними наблюдениями, свидетельствующими о сходстве состава углистых хондритов и двух спутников Марса, Фобоса [110] и Деймоса [108], которые либо представляют собой остатки первичного процесса формирования, либо были захвачены позже. Однако в случае Земли из всех 78 обнаруженных кратеров (вероятно, имеющих ударное происхождение), по-видимому, только три относятся к докембрийским временам (табл. 4). Хотя большая часть следов ранней истории Земли стерта вследствие геологической активности нашей планеты, модели образования планет земной группы [118, 147] предусматривают возникновение в начальный период гигантских кратеров [40, 36]. Современный приток внеземного вещества [144] и данные о поздней стадии интенсивной метеоритной бомбардировки Луны, закончившейся приблизительно 4,0 млрд. лет тому назад [129, 145], также свидетельствуют, что Земля, приблизившись к конечному значению своей массы все еще находилась под воздействием интенсивной бомбардировки оставшимся веществом роя планетезималей.

Таблица 4

### Вероятные ударные кратеры докембрийского времени [46]

Название	Широта	Долгота	Диаметр, км	Возраст, млрд. лет
Вредефорт, Южная Африка	27° 00' ю. ш.	027° 30' в. д.	140	1,97±0,10
Садбери, Канада	46° 36' с. ш.	081° 11' з. д.	140	1,84±0,15
Янисьярви, СССР	61° 58' с. ш.	030° 55' в. д.	14	0,70

Хотя в настоящее время приток кометного вещества на Землю невелик [135, 136, 148], вклад кометоподобных тел из

<sup>1)</sup> Перевод С. Шервинского.

внешней части Солнечной системы в столкновения, претерпеваемые Землей в ранний период, должен был на много порядков превышать современное его значение. Действительно, Уэзерилл [145] показал, что, хотя  $\sim 99\%$  первичного межпланетного вещества было выброшено из Солнечной системы под влиянием Юпитера, возмущения, вносимые планетами-гигантами, привели к перемещению холодных, богатых летучими соединениями тел малого размера из зоны орбит Урана — Нептуна во внутреннюю часть Солнечной системы. Там они должны были находиться в течение  $10^8$  лет, прежде чем разрушиться при столкновениях с планетами или покинуть пределы Солнечной системы [146].

По оценке Уэзерилла [145], приток кометного материала на Луну в первые 70 млн. лет ее истории составил  $\sim 2,0 \cdot 10^{20}$  г (табл. 5). Поскольку Земля имеет большую массу, логично заключить, что число кометных ядер, претерпевших столкновение с Землей за тот же период, было выше. Однако следует заметить, что множество допущений, принимаемых в подобных расчетах, затрудняет точную оценку количества кометного вещества, претерпевшего аккрецию на Землю. Несмотря на эту неопределенность, Джосс [68] показал, что за время пребывания Солнца на главной последовательности,  $4,5 \cdot 10^9$  лет, им захвачено  $\sim 10^{26}$  г вещества кометных ядер. Оценка Джосса, которая дает верхний предел числа комет, захваченных Землей, сравнима с независимо полученным результатом Уиппла [148]. По его расчетам, наша планета в ходе позднего периода аккреции могла захватить менее  $10^{25-26}$  г кометного вещества из короткоживущей ( $\sim 10^8$  лет) кометной туманности общей массой  $10^{29}$  г, локализованной внутри орбиты Юпитера.

Таблица 5

Кометный материал,  
захваченный телами Солнечной системы [104]

	Масса захваченного кометного материала, г	Время	Литература
Солнце	$10^{26}$	Стадия пребывания на главной последовательности	[68]
Венера	$> 4 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^9$ лет	[78]
Луна	$2 \cdot 10^{20}$	Период поздней аккреции	[145]
Земля	$2 \cdot 10^{14-18}$	Первые 2 млрд. лет	[95]
	$< 10^{25-26}$	Период поздней аккреции	[148]
	$\sim 3,5 \cdot 10^{21}$	Период поздней аккреции	[124]
	$\sim 7 \cdot 10^{23}$	4,5 млрд. лет	[26]
	$\sim 2 \cdot 10^{22}$	4,5 млрд. лет	[111]
	$10^{23}$	Первые 2 млрд. лет	[103, 104]

Из независимых расчетов, основанных на динамических ображениях и значениях скорости образования лунных кратеров [102—104, 111], а также на распространениях химических элементов в Солнечной системе [26], следует, что Земля могла получить  $10^{22-23}$  г кометного вещества вследствие аккреции в течение различных промежутков времени (табл. 5). Из независимо полученного Оро и др. [102—104] и Чангом [26] значения  $10^{23}$  г и распространностей элементов, полученных Дельземмом [28], следует, что, поскольку содержание углерода в кометах в десять раз выше, чем в хондритах типа С1 (где оно составляет  $\sim 3,5\%$  по массе), столкновения с кометами привнесли на поверхность первичной Земли около  $10^{22}$  г углерода. Последнее значение по порядку величины совпадает с оценками количества углерода, захороненного в осадочной оболочке Земли, —  $1,9 \cdot 10^{22}$  [62, 63] и  $1,2 \cdot 10^{22}$  г [122], и на четыре порядка превышает расчетное содержание углерода в составе живых организмов,  $\sim 10^{18}$  г [1, 37]. Приводя это сравнение, мы, конечно, не намерены сделать вывод, что земная жизнь имеет в конечном счете кометное происхождение, а, скорее, хотим показать, что кометы могли внести заметный вклад в запас H, C, N, O, S и других органогенных элементов на Земле, послуживших (либо непосредственно, либо в форме простых органических соединений) в качестве сырья для дальнейшего абиогенного химического синтеза. Итак, по-видимому, захват комет первичной Землей имел важное значение для создания соответствующих восстановительных условий и влажной среды, необходимых для появления и ранней эволюции жизни [104].

Хотя недостаток инертных газов на Земле по сравнению с их содержанием на Солнце [17, 86, 115, 117] свидетельствует, что Земля приобрела вторичную атмосферу в результате высвобождения летучих из ее недр (ср. [139]), ряд авторов недавно рассмотрели возможность образования первичной атмосферы при соударениях с телами, богатыми летучими [5, 13, 52]. Действительно, из-за сходства массы и орбитальных параметров Земли и Венеры вероятность их столкновений с малыми телами должна быть примерно одинакова. Из этого вывода, который был количественно подтвержден Эверхартом [35] для случая  $10^9$  гипотетических комет, движущихся по случайным параболическим орбитам (рис. 2), следует, что, если главным источником летучих на Земле были столкновения с кометами, содержание инертных газов и отношение N к C для обеих планет должны быть примерно одинаковы [109]. Однако это не так; определение содержаний нерадиогенных  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar}$  и  $^{20}\text{Ne}$  в атмосфере Венеры, выполненное с помощью зонда «Пионер — Венера» показали, что на Венере существует большой избыток (в  $\sim 100$  раз) инертных газов первичного происхождения по сравне-

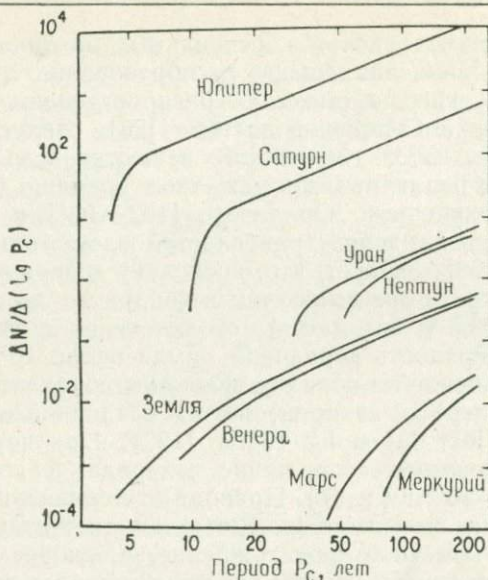


Рис. 2. Распределение периодов  $10^9$  гипотетических комет со случайными параболическими орбитами, захватываемых планетами. По оси ординат отложено число захваченных комет  $\Delta N$ , соответствующее постоянному приращению логарифма периода  $P_c$ , приведенного в годах [35].

нию с Землей [55, 56, 106, 107]. Эти измерения привели Поллака и Блэка ([109], см. также [111]) к предположению, что пылевые частицы солнечной туманности, из которых образовались планетезимали и планеты, могли содержать нелетучие органические соединения, которые в процессе дальнейшей эволюции планет высвобождали летучие, сформировавшие атмосферы Венеры, Земли и Марса. Однако из модели неомогенной аккреции Земли [23, 47, 48, 130, 131], подтверждаемой рядом геологических данных, следует, что планеты земной группы могли приобрести значительную часть летучих в результате аккреции хондритного материала [4, 105, 139].

Хотя возможно, что интенсивная дегазация могла протекать в ходе фазы аккреции (тогда Земля должна была иметь высоковосстановительную атмосферу [111]), присутствие метасодочных пород Исуа (Гренландия), имеющих возраст  $3,8 \times 10^9$  лет, которые образовались при относительно умеренной температуре менее  $150^\circ\text{C}$  и, вероятно, менее  $80^\circ\text{C}$  [3], свидетельствует, что, если метан и являлся преобладающей формой углерода в первичной атмосфере Земли, через 800 млн. лет после ее образования он был уже замещен двуокисью углерода (рис. 3).

Итак, либо постулированная Опариным [91] и Юри [134] высоковосстановительная атмосфера ( $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ) существовала относительно недолго, либо, как это следует из модели негомогенной аккреции, она вообще никогда не существовала [138]. Уокер [138—140] привел довольно убедительные аргументы, что предбиологическая атмосфера состояла главным образом из  $CO_2$  и  $H_2O$ ,  $N_2$  был второстепенным компонентом, а  $H_2$  ( $\sim 1\%$ ) и  $CO$  присутствовали лишь в незначительных количествах.

Однако при воспроизведении таких слабо восстановительных атмосфер в лабораторных имитационных экспериментах образуются лишь пренебрежимо малые количества немногих органических соединений. Так, Чэмейдес и Уокер [25] показали, что в предбиологической атмосфере с преобладанием  $CO_2$  ударные процессы, возникающие из-за воздействия молний и падений метеоритов, должны приводить к образованию небольших количеств  $H_2CN$ , которая, как известно, является ключевым промежуточным соединением в синтезе аминокислот, пуринов, пиримидинов и конденсирующих молекул (ср. [100]). Итак, мы можем прийти к заключению, что, хотя высокое парциальное давление свободного  $H_2$  по экспериментальным данным ингибирует синтез частично дегидрогенизованных соединений типа пуринов и пиримидинов ([113], см. также [12]), неэнзиматический синтез биохимических мономеров и их полимеров (см. табл. 7) должен нуждаться в таких предбиологических природных условиях, которые не были бы слишком восстановительными ( $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ), но и не соответствовали бы условиям ранней окислительной атмосферы, обогащенной кислородом, по сравнению с углеродом.

Поскольку ударные волны, по-видимому, являются крайне эффективным источником свободной энергии для абиогенного синтеза аминокислот из высоковосстановительного предшественника [10, 11], представляется убедительным, что в условиях не слишком восстановительной предбиологической атмосферы,

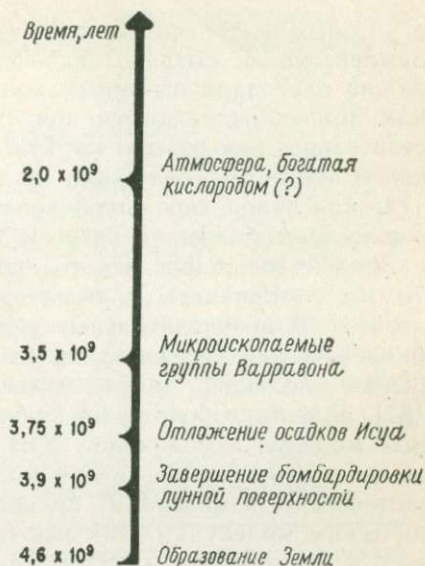


Рис. 3. Некоторые важнейшие вехи в ранней истории Земли.

о которых шла речь выше, кометы, захватываемые первичной Землей, могли сыграть значительную роль в химической эволюции благодаря огромным количеством тепла и ударным волнам, высвобождающимся при столкновениях с кометами. Действительно, при взрыве на Тунгуске в 1908 г., возможной причиной которого послужило падение фрагмента кометы Энке [72] или целой небольшой кометы массой  $\sim 10^{10}$  г [18], произошло высвобождение энергии  $10^{23}$  эрг, когда сталкивающееся с Землей тело, двигаясь со скоростью примерно 50 км/с [73, 76, 104], взорвалась на высоте  $\sim 8,5$  км над поверхностью Земли [14]. В неокислительных условиях природной среды в предбиологический период такие столкновения привели бы к разрушению большей части кометных органических соединений [82], но и высвободили бы значительное количество возбужденных молекул и радикалов (ОН, Н, СН, CN, NH<sub>2</sub>) непосредственно в атмосферу, где они могли подвергнуться дальнейшим химическим изменениям, приводящим к более сложным органическим молекулам. Так как на первичной Земле очень большая доля углерода и других органических элементов была заключена в карбонатах и других осадочных породах, богатых летучими соединениями, возбужденные молекулы-предшественники, вносимые кометами, должны были играть важную роль в предбиологическом синтезе органических молекул и их промежуточных соединений.

Хотя, как показано в работе [77], приток летучих соединений с кометами, в особенности H<sub>2</sub>O, должен был привести к быстрому химическому распаду атмосферных CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>S и других восстановленных молекул, очевидно, что соударения с кометами вызывали образование в атмосфере первичной Земли недолговечных высоковосстановительных областей, богатых реакционноспособными формами соединений. При резком охлаждении до низких температур из-за последующего расширения и охлаждения газового шара [114] химические соединения, образованные при ударе, рекомбинировали, что приводило к синтезу богатого набора органических соединений [104]. Они могли также вступать в каталитические реакции на поверхности металлических и силикатных частиц, которые, как известно, входят в состав кометных ядер. Эта гипотеза подтверждается реакциями типа Фишера — Тропша, в ходе которых равновесие в смеси простых предшественников (NH<sub>3</sub>, СО, Н<sub>2</sub> и т. д.) нарушается вследствие их взаимодействия в присутствии или в отсутствие катализатора [101]. Абиогенный синтез в этих условиях аминокислот [152], пуринов и пиримидинов [151] и жирных кислот с нормальной цепью от C<sub>10</sub> до C<sub>16</sub> [89] подтверждает, что аккреция кометных ядер могла

обеспечить сырье и источник свободной энергии, который привел к повышению скоростей реакций синтеза в условиях первичной Земли.

### Внеземные источники углерода

В дополнение к внутренним источникам в атмосфере [111, 139] и внеземному притоку хондритного [4] и кометного [104] вещества в ходе своей эволюции Земля почерпнула летучие соединения из двух добавочных источников, а именно: частиц солнечного ветра и межзвездного вещества. Количество углерода, поступающего вследствие аккреции из различных источников, показано в табл. 6. При этом вклад хондритного материала представлен нижней оценкой, выведенной на основе значения

Таблица 6

Внеземные источники углерода  
(оценка для первых 2 млрд. лет эволюции Земли)

Литература	Источник углерода	Общая масса, подвергшаяся аккреции, г	Количество углерода, подвергшегося аккреции, г
[144]	Метеорные тела	$> 2 \cdot 10^{19}$	$> 5 \cdot 10^{17}$
[104]	Кометы	$1 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{22}$
[22]	Межзвездные молекулярные облака	$1,5 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{15}$
Данная статья	Солнечный ветер	$> 3,8 \cdot 10^{17}$	$> 1,5 \cdot 10^{14}$

современного годового притока метеорных частиц  $10^{10}$  г, приведенного Уэзериллом [114], и предположения, что 50 % выпадающего вещества по составу соответствует углистым хондритам.

Солнечный ветер — это полностью ионизированный газ, возникающий в наружных слоях Солнца; химический состав его сравним с составом Солнца. Поскольку содержание  $^3\text{He}$  по отношению к протонам в солнечном ветре составляет  $\sim 10^{-5}$  [9], Уокер [139] принял, что приток на Землю  $^3\text{He}$ , равный  $7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , отвечает притоку протонов  $7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Поскольку распространенность углерода на Солнце в  $4 \cdot 10^4$  раз меньше, чем водорода, Земля за первые 2 млрд. лет получила  $\sim 10^{14}$  г углерода (табл. 6). Однако, поскольку Солнце вскоре после своего образования, вероятно, прошло стадию T Тельца с интенсивным солнечным ветром [23], Земля в начале эволюции могла почерпнуть из него гораздо больше углерода [111]. Возможно, что в отсутствие геомагнитного поля возбужденные атомы угле-

рода могли послужить источником энергии для реакции химического синтеза в верхних слоях палеоатмосферы [120].

В связи с вращением Солнца вокруг центра Галактики представляется возможным, что Солнечная система встречала на своем пути плотные межзвездные облака. Весьма вероятно, что такие встречи могли приводить к изменениям земного климата [80, 88, 128]; наряду с этим было выдвинуто предположение [22], что аккреция вещества межзвездных облаков на планеты земного типа также может быть ответственна за накопление некоторых изотопов, в частности Ne. Подобные встречи Солнца с межзвездными облаками нередки; действительно, по оценке Талбота и Ньюмена [127], за  $4,6 \cdot 10^9$  лет своего существования Солнечная система могла встретить от  $\sim 130$  до 140 облаков, содержащих более  $10^2$  атомов водорода на  $1 \text{ см}^3$ , и  $\sim 15$  облаков с концентрацией водорода более  $10^3$  атомов на  $1 \text{ см}^3$ . Как показали Батлер и др. [22], за счет таких встреч Земля могла получить  $1,5 \cdot 10^{15}$  г углерода (табл. 6). Итак, можно прийти к выводу, что в формировании природных условий, в которых прошло возникновение и ранняя эволюция жизни, приток летучих соединений из межзвездного пространства не играл такой важной роли, как привнос летучих кометами.

### Происхождение и древность земной жизни

Недавнее открытие сложной многокомпонентной совокупности микроископаемых в слоистых кварцитах группы Варравона в Западной Австралии, имеющей возраст  $\sim 3,5$  млрд. лет [8], и находки строматолитов в той же геологической последовательности [79, 143] свидетельствуют о том, что возникновение и ранняя эволюция жизни должны были произойти в очень раннем периоде истории Земли. Действительно, ранее сделанные оценки, согласно которым жизнь на Земле появилась  $\sim 4,0$  млрд. лет тому назад [98], подтвердились при молекулярном генеалогическом анализе размера поли(А)-сегмента мРНК ныне живущих организмов, который показал, что мРНК, а возможно, и жизнь появились  $3,85 \pm 0,2$  млрд. лет тому назад [24].

Поскольку возникновение жизни отодвинуто назад в начало архея, а возможно, и в более ранний период, стало очевидным, что появление первых живых систем совпало с завершением фазы интенсивной бомбардировки земной поверхности метеоритами и кометами (рис. 3). Естественно поэтому задать вопрос, не существует ли между этими событиями причинной связи, т. е. сыграло ли выпадение кометоподобных тел и метеоритного вещества какую-либо роль в формировании природных условий первичной Земли, тем самым воздействуя на возникновение [104] и раннюю эволюцию жизни [7].

Было выдвинуто предположение, что ударные волны, возникающие при таких столкновениях, служили источником энергии для реакций органического синтеза на первичной Земле [53, 54]. Действительно, для синтеза аминокислот при ударных волнах в трубках, содержащих высоковосстановительную модельную атмосферу ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), были получены очень высокие выходы [10, 11]. Если воздействие ударных волн естественного происхождения, возникающих на первичной Земле при столкновениях с метеоритами и кометами, приводило к сравнимым выходам, этот источник энергии мог сыграть важную роль в синтезе органических соединений [104]. Как обсуждалось выше, столкновение кометного ядра с неокислительной первичной атмосферой Земли, весьма вероятно, приводило к разрушению большей части органических молекул, присутствующих на сталкивающихся телах. Поэтому мы можем сделать вывод, что столкновения комет с первичной Землей не только служили источником летучих соединений и свободной энергии, но и создавали на короткое время высоковосстановительные условия в атмосфере с обогащением реакционноспособными формами соединений, что приводило к абиогенному синтезу органических соединений биологической значимости.

Со времен классического модельного опыта Миллера [81] по имитации предбиологической атмосферы лабораторные исследования, проведенные в последующие три десятилетия, явились существенным подтверждением классических идей Опарина [91—94] и Холдейна [49] о небиологическом первичном синтезе органических молекул как необходимым предшествующем этапе для возникновения жизни.

Большинство исследователей придерживаются той точки зрения, что простые молекулы, присутствовавшие в неокислительной атмосфере, гидросфере и литосфере Земли, вступали в реакции в результате воздействия различных форм энергии и каталитических эффектов (электрические разряды, ультрафиолетовое излучение, тепло, катализ типа Фишера—Тропша и т. д.). Такое воздействие привело к образованию широкого набора мономерных соединений, включая белковые и небелковые аминокислоты, сахара, жирные кислоты, пуриновые и пиримидиновые основания [100]. Дальнейшее накопление этих биохимических соединений в неглубоких водоемах на земной поверхности, вероятно, повлекло за собой конденсацию и полимеризацию, которые в свою очередь привели к соединениям с большим молекулярным весом. Возможные основные реакции, приводившие к предбиологическому синтезу мономеров и олигомеров, показаны в табл. 7. Многие продукты этих реакций отождествлены также и в углистых хондритах [87, 99], что предполагает их присутствие в ранней Солнечной системе и

в природных условиях предбиологической Земли в виде сложной гетерогенной смеси мономерных и макромолекулярных органических соединений.

Не исключено, что рудиментарные формы процессов репликации, транскрипции и трансляции могли развиваться при адсорбции олигонуклеотидов и олигопептидов на поверхностях глин

Таблица 7

### Главные пути предбиологических реакций

1. $\text{CO} + \text{H}_2$	Катализ типа Фишера — Тропша	→	Углеводороды, жирные кислоты
2. $\text{CH}_2\text{O}$	Основной катализ	→	Рибоза
3. $\text{CH}_3\text{CHO}, \text{CH}_2\text{O}$	Основной катализ	→	Дезоксирибоза
4. $\text{RCHO}, \text{HCN}, \text{NH}_3$	Конденсация Штрекера	→	Аминокислоты, оксикислоты
5. То же + $\text{CH}_2\text{S}$	Конденсация Штрекера	→	Цистеин, метионин
6. $\text{HCN}$	Основной катализ	→	Аденин, гуанин
7. $\text{HC}_3\text{N}$ + мочеви́на	Конденсация	→	Урацил, цитозин
8. То же + $\text{CH}_2\text{O}$	Гидразин	→	Тимин
9. Аминокислоты	Цианамид	→	Олигопептиды
10. Мононуклеотиды	Цианамид	→	Олигонуклеотиды
11. Изопрен	УФ, иониз. радиация	→	Полиизопrenoиды
12. Жирные кислоты, глицерин, фосфат, основания	Цианамид	→	Нейтральные липиды, фосфолипиды

или в результате встречи этих молекул в растворе, имеющей кинетический характер. Однако мы отдаем предпочтение возможности, что кооперативная ассоциация предбиологически синтезированных олигомеров протекала в составе фазовообособленных термодинамически открытых многомолекулярных микросистем [92—94]. Недавно проведенный синтез амфифильных липидов в модельных предбиологических условиях [50, 51, 102, 30] говорит о том, что эти амфифильные молекулы имелись на первичной Земле и сделали возможным образование предбиологических липосом (рис. 4). Таким образом возникло мик-

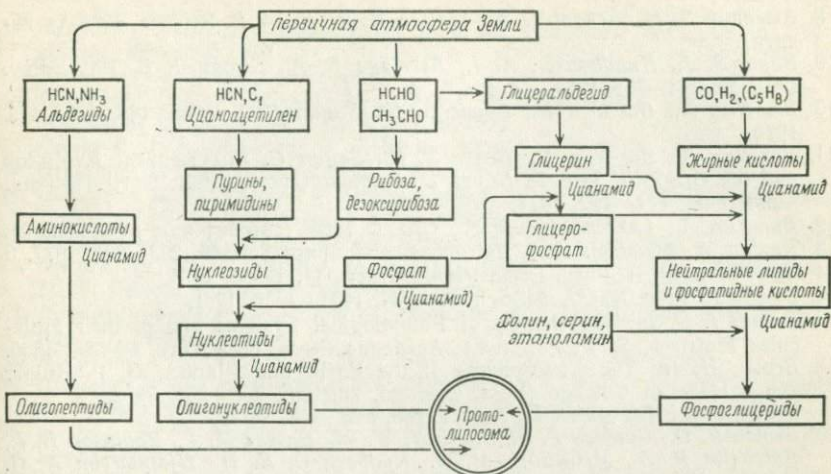


Рис. 4. Абиогенный органический синтез биомономеров и полимеров и возникновение предклеточных систем (согласно [100]).

роокружение, способность которого к селективному поглощению и концентрированию ионов, слабых оснований и других соединений [30] привела в конечном счете к эволюции систем биокаталитических пептидов (протоферментов), информационных самореплицирующихся молекул (прото-тРНК) и пептидсинтезирующих комплексов (проторибосом) из которых появились первые живые системы [100].

Авторы признательны д-ру М. Мур и д-ру А. Уотсону за несколько полезных ссылок, а также участникам Летней школы НАСА по биологии планет и экологии микроорганизмов (1980 г.) и Первой европейской летней школы по происхождению и ранней эволюции жизни за ценные обсуждения. Эта работа частично финансировалась НАСА (дотация NGR-44-005-002, Дж. Оро) и получила финансовую поддержку CONACYT (Мехико, А. Ласкано-Араухо).

### Литература

1. Abelson P. H. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 6, 325—351, 1978.
2. Adams W. S. Publ. Astron. Soc. Pacific, 55, 217—225, 1943.
3. Ahmad S. N., Perry E. C. Sci. Prog. Oxford, 66, 499—511, 1980.
4. Anders E., Owen T. Science, 198, 453—465, 1977.
5. Arrhenius G., De B. R., Aljven H. In: The Sea. E. D. Goldberg (ed.), Wiley, New York, 5, 839—861, 1974.
6. Ausloos P., Rebbert R. E., Lias S. G. Jour. Chem. Phys., 42, 540—548, 1965.
7. Awramik S. M. In: Biotic Crises in Ecological and Evolutionary Time, M. H. Nitecki (ed.), Academic Press, New York, 1980 (в печати).

8. *Awramik S. M., Schopf J. W., Walter M. R., Buick R.* Science, 1980 (в печати).
9. *Bame S. J., Hundhausen A. J., Asbridge P. A., Strong I. B.* Phys. Rev. Lett., **20**, 393—395, 1968.
10. *Bar-Nun A., Bar-Nun N., Bauer S. H., Sagan C.* Science, **168**, 470—473, 1970.
11. *Bar-Nun A., Bar-Nun N., Bauer S. H., Sagan C.* In: Chemical Evolution and the Origin of Life, R. Buvet, C. Ponnampertuma (eds.), North-Holland, Amsterdam, 114—122, 1971.
12. *Bar-Nun A., Lazcano-Araujo A., Oro J.* 1981 (готовится к публикации).
13. *Benlow A., Meadows A. J.* Astrophys. and Space Sci., **46**, 293—300, 1977.
14. *Ben-Menahem A.* Phys. Earth Planet. Inter., **11**, 1—35, 1975.
15. *Berger R.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, **47**, 1434—1436, 1961.
16. *Bernal J. D.* In: The Origins of Prebiological Systems and of their Molecular Matrices, S. W. Fox (ed.), Academic Press, New York, 65—88, 1965.
17. *Brown H.* In: The Atmospheres of the Earth and Planets, G. P. Kuiper (ed.), Univ. of Chicago Press, Chicago, 2nd ed., 258—266, 1952.
18. *Brown J. C., Hughes D. W.* Nature, **268**, 512—514, 1977.
19. *Brown R. D., Godfrey P. S., Storey J. W. W., Bassez M. P., Robinson B. J., Batchelor R. A., McCulloch M. G., Rudbeck O. E. H., Hjalmarsen A. G.* Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **186**, 5P—8P, 1979.
20. *Brownlee D. E.* In: Cosmic Dust, J. A. M. McDonnell (ed.), Wiley, Chichester, 295—336, 1978.
21. *Brownlee D. E.* Abstracts of the Fifth College Park Colloquium on Chemical Evolution: Comets and the Origin of Life, Oct. 29—31, 1980, 21.
22. *Butler D. M., Newman M. J., Talbot R. J.* Science, **201**, 522—525, 1978.
23. *Cameron A. G. W., Pine M. R.* Icarus, **18**, 377—406, 1973.
24. *Carlín R. K.* Jour. Theor. Biol., **82**, 353—362, 1980.
25. *Chamedies W. L., Walker J. G. C.* Nature, 1980 (представленная работа).
26. *Chang S.* In: Space Missions to Comets, M. Neugebauer, D. K. Yeomans, J. C. Brandt, R. W. Hobbs (eds.), NASA CP.2089, Washington, 59—111, 1979.
27. *Chapman C. R.* Geochim. Cosmochim. Acta, **40**, 701—719, 1976.
28. *Delsemme A. H.* In: Comets, Asteroids, Meteorites, A. H. Delsemme (ed.), Univ. Toledo Press, Toledo, Ohio, 3—13, 1977.
29. *Delsemme A. H.* In: Space Missions to Comets, M. Neugebauer, D. K. Yeomans, J. C. Brandt, R. W. Hobbs (eds.), NASA CP 2089, Washington, 139—178, 1979.
30. *Deamer D. W., Oro J.* Biosystems, **12**, 167—175, 1980.
31. *Dezafra R. L., Thaddeus P., Kutner M., Scoville N., Solomon P. M., Weaver H., Williams R. R. W.* Astrophys. Lett., **10**, 1—3, 1971.
32. *Dobrovolsky O. V., Kaimakov E.* In: Comets, Asteroids, Meteorites, A. H. Delsemme (ed.), Univ. of Toledo Press, Toledo, Ohio, 37—46, 1977.
33. *Donn B. D.* The Study of Comets. NASA SP-393, Washington, 611—619, 1976.
34. *Donn B. D., Khanna R. K.* Astrophys. and Space Sci., **68**, 19—26, 1980.
35. *Everhart E.* Astronom. Jour., **74**, 735—750, 1969.
36. *Frey H.* In: Comparative Planetology, C. Ponnampertuma (ed.), Academic Press, New York, 79—101, 1978.
37. *Garrels R. M., MacKenzie F. T.* Marine Chem., **1**, 27—36, 1978.
38. *Glaser J. A.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, **47**, 174—180, 1961.
39. *Glaser J. A.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA, **48**, 491—496, 1962.
40. *Goodwin A. M.* In: The Early History of the Earth, B. F. Windley (ed.), Wiley, London, 77—95, 1976.
41. *Goldanskii V. I.* Nature, **268**, 612—613, 1977.
42. *Greenberg J. M.* In: Comets, Asteroids, Meteorites, A. H. Delsemme (ed.), Univ. of Toledo Press, Toledo, Ohio, 491—467, 1977.

43. Greenberg J. M. In: Cosmic Dust, J. A. M. McDonnell (ed.), Wiley, Chichester, 187—294, 1978.
44. Greenberg J. M. См. этот сборник.
45. Greenberg J. M., Yencha A. J., Corbet J. W., Frisch H. L. Mem. Soc. Roy. des Sci. de Liège, 62, serie III, 425—436, 1972.
46. Grieve R. A. F., Robertson P. B. Icarus, 38, 212—229, 1979.
47. Grossman L. Geochim. Cosmochim. Acta, 36, 597—619, 1972.
48. Grossman L., Larimer J. W. Rev. Geophys. Space Phys., 12, 71—101, 1974.
49. Haldane J. B. S. Rationalist Annual., 148, 3—10, 1928.
50. Hargreaves W. R., Mulvihill S. J., Deamer D. W. Nature, 266, 78—80, 1977.
51. Hargreaves W. R., Deamer D. W. In: Light Transducing Membranes, D. W. Deamer, (ed.), Academic Press, New York, 23—59, 1978.
52. Henderson-Sellers A., Benlow A., Meadows A. J. Quart. Jour. Roy. Astron. Soc., 21, 74—81, 1980.
53. Hochstim A. R. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 50, 200—208, 1963.
54. Hochstim A. R. In: Chemical Evolution and the Origin of Life, R. Buwet, C. Ponnampertuma (eds.), North-Holland, Amstredam, 96—113, 1971.
55. Hoffman J. H., Hodges R. R., McElroy M. B., Donahue T. M., Kolpin M. Science, 203, 800—802, 1979.
56. Hoffman J. H., Hodges R. R., McElroy M. B., Donahue T. M., Kolpin M. Science, 205, 49—52, 1979.
57. Hollis J. M., Snyder L. E., Suenram R. D., Lovas F. J. Astrophys. Jour., 1980 (в печати).
58. Hoyle F., Wickramasinghe C. Lifecloud: The Origin of Life in the Universe. Harper and Row, New York, 1977.
59. Hoyle F., Wickramasinghe C. Astrophys. and Space Sci., 65, 241—244, 1979.
60. Hoyle F., Wickramasinghe C. Astrophys. and Space Sci., 66, 77—90, 1979.
61. Hoyle F., Wickramasinghe C. Astrophys. and Space Sci., 68, 499—503, 1980.
62. Hunt J. M. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 56, 2073—2077, 1972.
63. Hunt J. M. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 61, 100—104, 1977.
64. Irvine W. M., Leschine S. B., Schloerb F. P. Nature, 283, 748—749, 1980.
65. Irvine W. M., Lechine S. B., Schloerb F. P. Proc. 6th Int. Conf. Origins of Life, Jerusalem, Israel, June 22—27, 1980, 27—32, 1980.
66. Johnson F. M. Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, 6th ser., 3, 391—407, 1972.
68. Joss P. C. Astrophys. Jour., 191, 771—774, 1974.
69. Каймаков Е. А. Моделирование кометных явлений. — Л.: Наука, 1974.
70. Каймаков Е. А., Шарков В. И. In: The Motion, Evolution of Orbits and Origin of Comets, G. A. Chebotarev, E. I. Kasimirchak-Polonskaya, B. G. Marsden (eds.), Reidel, Dordrecht, 303—315, 1972.
71. Каймаков Е. А. Роль органических соединений в кометах. — Л.: Наука, 1979.
72. Krésak L. Bull. Astron. Inst. Czechosl., 29, 129—134, 1978.
73. Krinov E. I. Giant Meteorites. Pergamon Press, New York, 1966.
74. Lazcano-Araujo A. In: El Origen de la Vida: Symr. Commemorative en Homenaje a A. I. Oparin, A. Lazcano-Araujo, A. Barrera (eds.), UNAM, Mexico, 99—139, 1978.
75. Lemmon R. M. 1979 (частное сообщение).
76. Levin B. Yu. Meteoritika, 11, 132—139, 1954.
77. Levine J. S., Augustsson T. R., Boughner R. E., Natarajan M., Sacks L. J. Abstracts of the Fifth College Park Colloquium on Chemical Evolution: Comets and the Origin of Life, Oct. 29—31, 1980, 25—26, 1980.
78. Lewis J. S. Earth and Planet. Sci. Lett., 22, 239—244, 1974.
79. Lowe D. R. Nature, 284, 441—443, 1980.
80. McCrea W. H. Nature, 225, 607—609, 1975.
81. Miller S. L. Science, 117, 528—529, 1953.

82. *Миллер С., Юри Г. В. сб.: Проблемы эволюционной и индустриальной биохимии/Под ред. В. Л. Кретовича, Т. Е. Павловской, Г. А. Деборина — М.: Наука, 1964.*
83. *Miller S. L., Urey H. C., Oro J. Jour. Mol. Evol., 9, 59—72, 1976.*
84. *Moorbath S., O'Nione R. K., Pankhrust F. J. Nature, 245, 4365, 1973.*
85. *Moore M. H., A'Hearn M. E., Donn B. D., Khanna R. K. Abstracts of the Fifth College Park Colloquium on Chemical Evolution: Comets and the Origin of Life, Oct. 29—31, 1980, 17.*
86. *Moulton R. P. Astrophys. Jour., 22, 165—181, 1905.*
87. *Nagy B. Carbonaceous Meteorites. Elsevier, Amsterdam, 1975.*
88. *Newman M. J. Origins of Life, 10, 105—110, 1980.*
89. *Nooner D. W., Gibert J. M., Gelpi E., Oro J. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 915—924, 1976.*
90. *Опарин А. И. Происхождение жизни. — М.: Московский рабочий, 1924.*
91. *Oparin A. I. The Origin of Life. MacMillan, New York, 1936.*
92. *Oparin A. I. In: Prebiotic and Biochemical Evolution, A. P. Kimball, J. Oro (eds.), North-Holland, Amsterdam, 1—7, 1971.*
93. *Oparin A. I. In: Exobiology. C. Ponnampertuma (ed.), North-Holland, Amsterdam, 1—15, 1972.*
94. *Oparin A. I. In: El Origen de la Vida: Symposium Commemorativo el Homenaje a A. I. Oparin, A. Lazcano-Araujo, A. Barrera (eds.), UNAM, Mexico, 137—144, 1979.*
95. *Oro J., Nature, 190, 389—390, 1961.*
96. *Oro J. Ann. New York Acad. Sci., 108, 464—481, 1963.*
97. *Oro J. Nature, 197, 971—974, 1963.*
98. *Oro J. Journ. Brit. Interplan. Soc., 21, 12—25, 1968.*
99. *Oro J. Space Life Sci., 3, 507—550, 1972.*
100. *Oro J., Lazcano-Araujo A. In: Cyanide in Biology, B. Vennesland, E. E. Conn, C. J. Knowles, J. Westley, F. Wissing (eds.), Academic Press, London, 1981.*
101. *Oro J., Miller S. L., Urey H. C. In: Living Systems as Energy Converters, R. Buvet, M. J. Allen, J. P. Massuè (eds.), North-Holland, Amsterdam, 7—19, 1977.*
102. *Oro J., Sherwood E., Eichberg J., Epps D. In: Light Transducing Membranes, Academic Press, New York, 1—21, 1978.*
103. *Oro J., Holzer G., Lazcano-Araujo A. In: Workshop on Experimental Approaches to Comets. J. Oro (convener), Lunar and Planetary Institute, Houston, 54—59, 1978.*
104. *Oro J., Holzer G., Lazcano-Araujo A. In: COSPAR: Life Sciences and Space Research XVIII, R. M. Holmquist (ed.), Pergamon Press, Oxford, New York, 67—82, 1980.*
105. *Owen T. In: Evolution of Planetary Atmospheres and Climatology of the Earth. CNRS, Toulouse, 1—10, 1978.*
106. *Oyama V. I., Carle G. C., Woeller F., Pollack J. B. Science, 203, 802—805, 1979.*
107. *Oyama V. I., Carle G. C., Woeller F., Pollack J. B. Science, 205, 52—54, 1979.*
108. *Pang K. D., Rhoads J. W., Lane A. L., Ajello J. M. Nature, 283, 277—278, 1980.*
109. *Pollack J. B., Black D. G. Science, 205, 56—59, 1979.*
110. *Pollack J. B., Veverka J., Pang K. D., Colburn D., Lane A. L., Ajello J. M. Science, 199, 66—69.*
111. *Pollack J. B., Yung Y. L. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 8, 425—487, 1980.*
112. *Ponnampertuma C. Ann. New York Acad. Sci., 194, 56—70, 1971.*
113. *Ponnampertuma C., Lemmon R. M., Mariner R., Calvin M. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 49, 737—740, 1963.*
114. *Пайзеп Ю. П. ЖЭТФ, 37, 1229—1234, 1960.*

115. *Rasool S. I.* In: *Exobiology*, C. *Ponnamperuma* (ed.), North-Holland, Amsterdam, 369—399, 1972.
116. *Ring D.*, *Wolman Y.*, *Friedmann N.*, *Miller S. L.* *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **19**, 997—1001, 1933.
117. *Russel H. N.*, *Menzel D. H.* *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **19**, 997—1001, 1933.
118. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.
119. *Salpeter E. E.* In: *III Regions and Related Topics*, T. L. *Wilson*, D. *Dow-nes* (eds.), Springer-Verlag, Berlin, 1—16, 1975.
120. *Sagan C.* *Nature*, **206**, 448, 1965.
121. *Sagan C.* In: *Molecules in the Galactic Environment*, M. A. *Gordon*, L. E. *Snyder* (eds.), Wiley, New York, 451—468, 1973.
122. *Schidłowski M.* In: *Origin of Life*, H. *Noda* (ed.), Japan Soc. Sci. Press, Tokyo, 3—20, 1978.
123. *Shoemaker E. M.* In: *Impact and Explosion Cratering*, D. J. *Roddy*, R. O. *Pepin*, R. B. *Merrill* (eds.), Pergamon Press, New York, 1—10, 1977.
124. *Sill G. T.*, *Wilkening L. L.* *Icarus*, **33**, 13—22, 1978.
125. *Simon M. N.*, *Simon M.* *Astrophys. Jour.*, **184**, 757—761, 1973.
126. *Simon M. M.*, *Owen T.*, *Simon M.* *Nature*, **252**, 666, 1974.
127. *Talbot R. J.*, *Newman M. J.* *Astrophys. Jour. Suppl. Ser.*, **34**, 295—308, 1977.
128. *Talbot R. J.*, *Butler D. M.*, *Newman M. J.* *Nature*, **262**, 561—563, 1976.
129. *Tera F.*, *Papanastassiou D. A.*, *Wasserburg G. J.* *Earth Planet. Sci. Lett.*, **22**, 1—21, 1974.
130. *Turekian K. K.*, *Clark S. P.* *Earth Planet. Sci. Lett.*, **6**, 346—348, 1969.
131. *Turekian K. K.*, *Clark S. P.* *Jour. Atm. Sci.*, **32**, 1257—1261, 1975.
132. *Turner B.* *Bull. Am. Astron. Soc.*, **10**, 627, 1978.
133. *Turner B.* *Jour. Mol. Evol.*, **15**, 79—101, 1980.
134. *Urey H. C.* *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **38**, 351—363, 1952.
135. *Urey H. C.* *Nature*, **179**, 556—557, 1957.
136. *Urey H. C.* *Nature*, **242**, 32—33, 1973.
137. *Wald G.* *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **52**, 595—611, 1964.
138. *Walker J. G. C.* In: *The Early History of the Earth*, B. F. *Windley* (ed.), Wiley, New York, 537—546, 1976.
139. *Walker J. G. C.* *Evolution of the Atmosphere*. McMillan, New York, 1977.
140. *Walker J. G. C.* In: *Comparative Planetology*, C. *Ponnamperuma* (ed.) Academic Press, New York, 141—163, 1978.
141. *Wallerstein G.* *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **11**, 115—134, 1973.
142. *Wallis M. K.* *Nature*, **284**, 431—433, 1980.
143. *Walter M. R.*, *Buick R.*, *Dunlop J. S. R.* *Nature*, **284**, 443—445, 1980.
144. *Wetherill G. W.* *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **2**, 303—331, 1974.
145. *Wetherill G. W.* *Proc. Lunar Sci. Conf.* **6th**, 1539—1559, 1975.
146. *Wetherill G. W.* *Proc. Lunar Sci. Conf.* **8th**, 1—16, 1977.
147. *Wetherill G. W.* *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **18**, 77—113, 1980.
148. *Whipple F.* *Mem Soc. Roy. des Sci. de Liège*, 6e serie, IX, 101—111, 1976.
149. *Wickramasinghe N. C.* *Nature*, **252**, 452—453, 1974.
150. *Wickramasinghe N. C.* *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.*, **170**, 11P—16P, 1975.
151. *Yang C. C.*, *Oro J.* In: *Chemical evolution and the Origin of Life*, R. *Bu-vet*, C. *Ponnamperuma* (eds.), North-Holland, Amsterdam, 152—167, 1971.
152. *Yoshino D.*, *Hayatsu R.*, *Anders E.* *Geochim. Cosmochim. Acta*, **35**, 927—938, 1971.

# Кометы — средство передвижения в теории панспермии

Ф. Хойл, Ч. Викрамасингх<sup>1)</sup>

Приведены доводы в пользу того, что жизнь — космическое явление. Данные о физических и химических условиях, присущих кометам, благоприятствуют гипотезе о том, что кометы переносят, приумножают и распространяют жизнь повсюду во Вселенной.

Ранние истоки теории панспермии теряются в дымке древности. Считают, что Анаксагор, греческий философ, живший около 500 лет до н. э. и впервые открывший истинную причину затмений, был первым, кто явно сформулировал принцип панспермии: зачатки животной и растительной жизни искони присущи космосу и пускают корни везде, где имеются благоприятные условия. Немногим более столетия тому назад эта идея возродилась с новой силой. Не все помнят, что это возрождение произошло главным образом благодаря работам Луи Пастера. Действительно, Пастер показал, что жизнь видится нам всегда возникающей из жизни, и принцип панспермии является естественным обобщением полученных им результатов. Так, в 1874 г. физик Гельмгольц писал: «Мне кажется, что если все наши попытки вызвать образование организмов из неживой материи окажутся неудачными, с научной точки зрения вполне уместно поставить вопрос, возникла ли жизнь вообще, не является ли она такой же древней, как и сама материя, и не переносятся ли ее зародыши с планеты на планету, развиваясь везде, где они попадают на плодородную почву...»

Рассматривая геологические данные, мы не можем отрицать, что принцип возникновения живого только из живого действовал на протяжении периода от 3,83 млрд. лет тому назад до наших дней. Около 3,83 млрд. лет тому назад произошло отложение осадков Исуа, которые несут явные свидетельства существования фотосинтезирующих организмов [8]. Однако в более раннюю эпоху Земля была, по всей вероятности, стерильна. По данным недавних исследований Луны, как Земля, так и Луна подвергались интенсивной метеоритной бомбардировке, и поэтому на Земле не могло быть ни стабильной коры, ни атмо-

<sup>1)</sup> Факультет прикладной математики и астрономии, Университетский колледж, Кардифф, Уэльс, Великобритания.

сферы до тех пор, пока около 3,9 млрд. лет тому назад такая бомбардировка не прекратилась. Поэтому, рассматривая вопрос о возникновении жизни, мы можем отбросить первые 600 млн. лет истории Земли.

Обсуждая ситуацию, существовавшую ранее 3,83 млрд. лет тому назад, мы приходим к двум альтернативным логическим предположениям.

1) Химическая эволюция привела к самопроизвольному зарождению жизни примерно 3,83 млрд. лет тому назад.

2) Никакого самопроизвольного зарождения жизни на Земле не происходило, и принцип «живое возникает только из живого» выполнялся за счет панспермии. Семена жизни проросли, как только появились благоприятные физические условия, что произошло 3,83 млрд. лет тому назад.

Подавляющее большинство исследователей предпочитают первое предположение, хотя *a priori* для этого, конечно, никаких причин не существует. Мы приведем аргументы, что второе предположение на самом деле более вероятно и что транспортным средством для переноса, согласно принципу панспермии, служили, вероятнее всего, кометы.

При проверке возможности вышеуказанного положения 1) большое внимание уделялось возникновению индивидуальных биологических мономеров. Как показало множество тонких экспериментов, проводимых в течение ряда лет в ряде различных лабораторий, образование этих мономеров за счет неорганических процессов может не представлять особых затруднений. По существу, нет особых затруднений и с образованием небиологических полимеров, таких, например, как полипептиды и полинуклеотиды. Однако без ответа остается серьезный вопрос, касающийся возникновения присущего жизни объема информации. Информация, содержащаяся в живой материи, в качественном отношении весьма специфична, и в количественном отношении ее объем измеряется астрономическими цифрами. Каким образом стало возможным приобретение такого информационного содержания в исходных условиях хаотического распределения? Мы считаем, что в попытках решить этот вопрос применим простой метод умозаключений типа доведения до абсурда, свидетельствующий в значительной степени против возможности положения 1).

Хорошо известно, что существует около 1000—2000 ферментов, играющих центральную роль в жизненных процессах самых различных организмов, — начиная от простых микроорганизмов и кончая человеком. Изменения аминокислотных последовательностей этих ферментов от вида к виду носят в целом второстепенный характер. Ряд ключевых положений в этих цепях занимают почти неизменные аминокислоты.

Рассмотрим теперь, как могли в первичном бульоне возникнуть аминокислотные последовательности этих ферментов. Пусть в бульоне содержатся 20 биологически значимых аминокислот в равных концентрациях. По скромной оценке для соответствующей биологической активности фермента критическое значение имеют десять позиций. Число пробных сочетаний, необходимых для образования одного работоспособного фермента, составляет свыше  $20^{10}$ , а вероятность получить  $N$  таких ферментов при случайной сборке равна  $1 : 20^{10N}$ . Легко видеть, что полученное число пробных сочетаний превысит число атомов, содержащихся во всех звездах во Вселенной, прежде, чем мы придем к  $N=100$ . Из этого затруднения с числами можно сделать лишь *один из трех выводов*.

а) Жизнь — это космическое явление, и мы вынуждены принять принцип панспермии.

б) Жизнь — земное явление, но ее информационный объем обладает колоссальной избыточностью с коэффициентом  $\sim 20^{2000}$  в случае ферментов.

в) Жизнь — земное явление. Вероятность ее возникновения столь ничтожна, что жизнь представляет собой уникальное явление, присущее лишь Земле.

В настоящее время всеобщее мнение таково, что положение а) невозможно, а б) или в) должны быть истинны. С нашей же точки зрения, для б) нет никаких доказательств, в) выражает определенно докоперниковскую точку зрения, и поэтому нам остается возможность а).

Посмотрим теперь, как положение а) выдерживает сопоставление с тем, что нам известно из астрономии и биологии. Начала такого сопоставления можно найти в классическом труде Сванте Аррениуса «Миры в создании», впервые опубликованном в 1904 г. на шведском языке [1].

Аррениус везде следовал логике Пастера. Он рассмотрел возможность того, что бактериальные клетки (в особенности споры) удаляются от своих планет, покидая гравитационные потенциальные ямы из-за влияния электромагнитных эффектов, и затем рассеиваются в космосе под давлением излучения звезд. Для частиц бактериальных размеров (радиусы в несколько десятых микрометра) сила радиационного давления от звезды типа Солнца превышает силу тяжести. Частицы, освобожденные от гравитационного притяжения планеты, выносятся за пределы всей планетной системы. В весьма разреженном газе, подобном существующему между межзвездными газовыми облаками, эти частицы могут приобретать скорости  $\sim 100$  км/с и таким образом преодолевать расстояние между облаками менее чем за  $\sim 100\,000$  лет.

«Узкое место» в картине, обрисованной Аррениусом, состоит в том, что вынесенные частицы должны вновь войти в планетную систему другой звезды. Та же самая сила радиационного давления, которая вынесла частицы из одной системы, будет действовать как отталкивающая при их приближении к другой системе. Аррениус преодолел это затруднение, утверждая, что скорость частицы на некотором расстоянии от звезды принимает определенное значение, и если планета окажется на нужном месте и в нужное время, произойдет перенос живых клеток. Но приходится признать, что это редкое событие, и, по предположению Аррениуса, число клеток, достигающих Земли, в настоящее время не превышает нескольких дюжин в год.

Мы высказали соображения в пользу гораздо более эффективного процесса, приумножающего и рассеивающего жизнь в «космических» масштабах [7]. Прежде всего следует отметить, что общий элементный состав комет, по-видимому, хорошо согласуется с составом живой материи, как отмечал Дельземм [2]. Далее, в кометах присутствуют вода и органическое вещество, так что они потенциально содержат превосходную питательную среду для некоторых видов микроорганизмов. Мы утверждаем, что внутренние части комет жидкие из-за медленного высвобождения тепла химических и радиоактивных источников (например,  $^{26}\text{Al}$ ), присутствующих в материале, образующем кометы [4]. «Расплавившись», внутренняя часть остается жидкой на протяжении периодов времени геологического порядка, но значительный с точки зрения биологии прогресс может быть достигнут даже в течение нескольких лет. Условия «расплавленных» внутренних частей комет хорошо подходят для размножения автотрофных анаэробных бактерий. А условия замораживания, в целом преобладающие в кометах, подходят для неопределенно длительного сохранения почти всех форм микроорганизмов, известных в настоящее время на Земле.

Обратимся далее к космогонии Солнечной системы в связи с некоторыми из рассмотренных нами соображений. Предположим, что в родительском облаке, из которого сконденсировались Солнце и планеты, присутствовала некоторая популяция бактериальных клеток. Мы считаем, что основная масса вещества внутренних планет аккумулировалась при относительно высоких температурах в ходе ранней фазы эволюции Солнца, характеризующейся повышенной светимостью, так что любой имеющийся там биологический материал должен быть разрушен. Внешние планеты, Уран и Нептун, претерпели аккрецию из более холодных кометоподобных тел. Последние стадии аккумуляции этих тел сопровождалась захватом глубоко замороженных бактериальных клеток, присутствовавших в исходном родительском облаке. В процессе формирования Урана и Нептуна жидкая

вода могла в течение значительного времени в изобилии содержаться на множестве объектов планетного размера. На таких богатых водой объектах во внешней области Солнечной системы число живых клеток могло взрывоподобно увеличиться. Часть этих клеток выбрасывалась из Солнечной системы под воздействием радиационного давления, а часть оставалась и захватывалась кометами, которые, по нашему мнению, сформировались в зоне орбит наиболее удаленных планет. Эти клетки существовали внутри комет почти безгранично долго.

Теперь клетки выбрасывались вместе с летучими газами, когда кометы отклонялись во внутренние области Солнечной системы. Некоторые из этих клеток могли найти дорогу к планетам Солнечной системы, но большинство было вынесено в межзвездное пространство.

Клеткам, вынесенным из Солнечной системы, не просто внедриться на поверхность планет другой удаленной звездной системы. Они весьма эффективно тормозятся и задерживаются в первом же встретившемся плотном газовом облаке. Бактериальные клетки в космическом масштабе множатся в ходе процесса, включающего петлю обратной связи, показанную на рис. 1. Для Солнечной системы доля массы Солнца, возвращенной в межзвездный газ, оценивается в 1—10%. Основную часть этого возвращенного вещества составляют, конечно, H и He, но, по нашему мнению, около 1% его массы может находиться в форме биологического материала. Каждая звезда, образующаяся в Галактике, является потенциальным контуром цепи обратной связи, показанной на рис. 1. Принимая число таких контуров, равное  $10^{11}$ , можно считать, что в Галактике образуется  $10^7$ — $10^8 M_{\odot}$  биологического материала. Фактически это соответствует общей массе пылевых частиц, находящихся, согласно имеющимся данным, в спиральных рукавах Галактики.

Ввиду сказанного выше, мы рассмотрим теперь радикальную гипотезу, согласно которой межзвездные пылевые частицы являются бактериями. Если под «бактериями» подразумевать хорошо изученные земные бактерии, эта гипотеза достаточно хорошо соответствует данным наблюдений. Потеря свободной воды бациллой в условиях межзвездной среды показана на рис. 2.

Теперь, принимая известную для земных бактерий функцию распределения по размерам и не делая *никаких других допущений*, мы получим хорошее согласование с наблюдаемой зависимостью экстинкции от длины волны в диапазоне видимого излучения [5]. Хорошо известное примерное постоянство этой части кривой экстинкции теперь может быть понято с учетом свойств воспроизведения в микробиологии. При использовании модели частиц неорганической природы со свободными поверх-

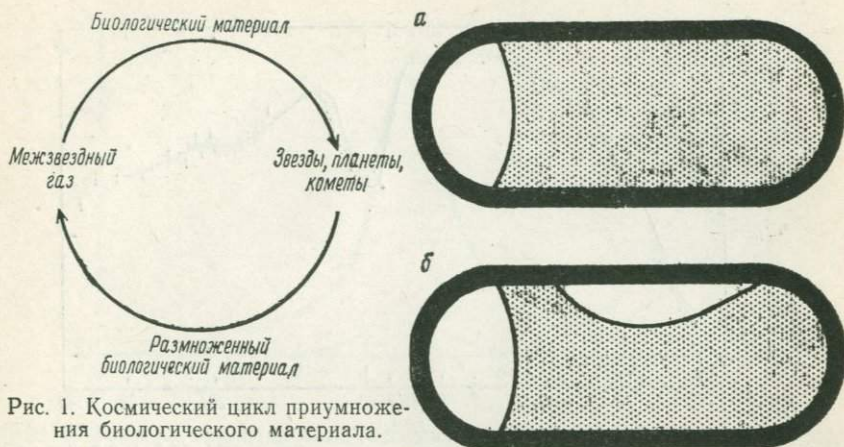


Рис. 1. Космический цикл приумножения биологического материала.

Рис. 2. Несколько стадий дегидратации бациллы.

ностями и изменяющимися плотностями газа постоянство размера всегда было трудным для понимания. Приходилось постулировать для данного типа частиц такой параметр размера, который оставался бы повсюду неизменным с точностью до нескольких процентов, а это затруднительно.

В инфракрасном диапазоне также имеются вполне определенные указания на органический состав пыли [10]. Можно считать, что две наиболее распространенные в Галактике молекулы,  $H_2$  и  $CO$ , полимеризованы в форме полисахаридов, в особенности в клеточных стенках растений. Поскольку целлюлоза — это в значительной степени преобладающее биосоединение на Земле, соответствие характеристик изучения сухой целлюлозы и свойств галактического инфракрасного источника OH 26,5 + + 0,6, показанное на рис. 3, нельзя просто обойти вниманием, как случайное [6].

Вновь обращаясь к экстинкции, заметим, что пыль заключает в себе практически все конденсируемые составляющие межзвездного газа. Более того, с точки зрения любой теории неорганической природы пыли представляется необычным, что это вещество поглощает с максимально возможной квантовой

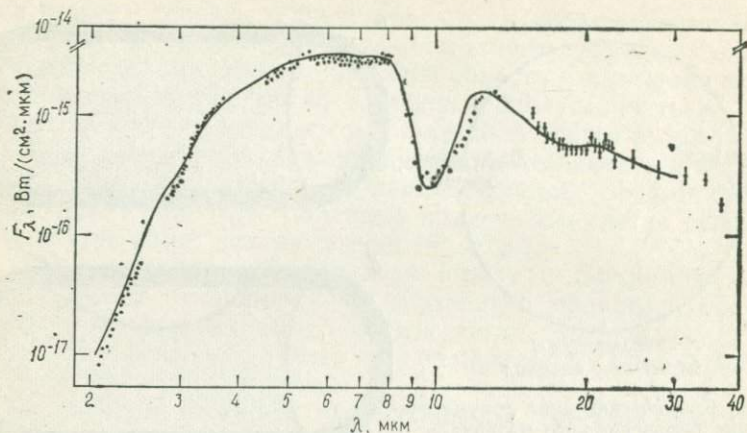


Рис. 3. Поток инфракрасного излучения от источника OH 26,5 + 0,6 (точки) в сопоставлении с моделью (сплошная линия), в которой излучающий материал представляет собой сухую целлюлозу.

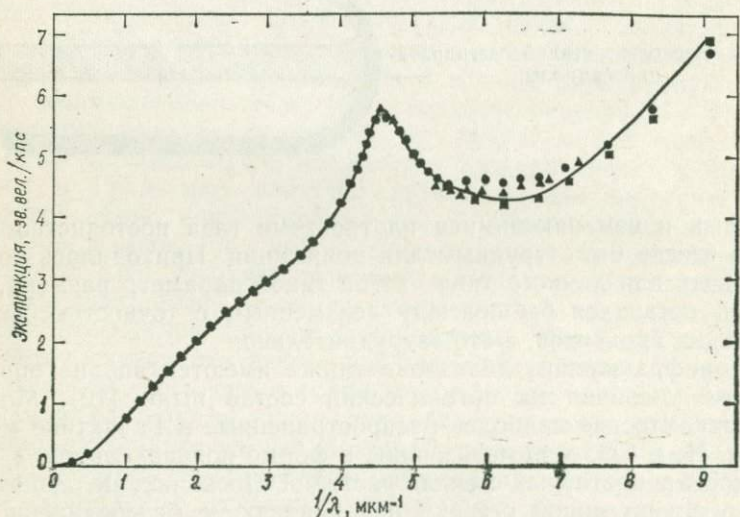


Рис. 4. Наилучшее достижимое соответствие между данными экстинкции на килопарсек как функции волнового числа (точки) и моделью состава, включающей (по массе) 65 % бацилл, 25 % микроплазм и 10 % графитовых сфер.

эффективностью оптическое и УФ-излучение, попадающее на каждую отдельную частицу в межзвездном пылевом облаке.

На рис. 4 представлена совокупность имеющихся данных по экстинкции (включая данные УФ-наблюдений, выполненных ОАО-2, ESA и TPI, наряду с оптическими данными и данными

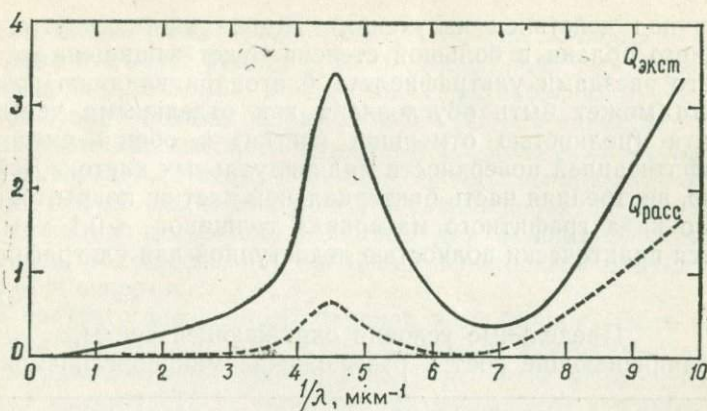


Рис. 5. Факторы эффективности рассеяния и экстинкции для графитовых сфер радиусом 0,02 мкм.

по ближнему инфракрасному излучению). Сплошная линия, замечательно точно аппроксимирующая эти данные, соответствует трехкомпонентной смеси частиц. Около 65 % по массе в этой смеси составляет полые диэлектрические цилиндры со средним показателем преломления  $m = 1,16 - 0,015i$ , используемые в качестве модели известного распределения по размерам и по составу для земных спорообразующих бактерий. Эти частицы, имеющие средний радиус  $1/3$  мкм, вносят вклад в поглощение главным образом в видимой области. Второй компонент включает частицы предполагаемой биологической природы с радиусами 0,04 мкм (показатель преломления  $m = 1,5$ ), составляющие около 25 % массы смеси. Эти частицы ответственны за восходящую часть кривой экстинкции в дальнем УФ-диапазоне. Третий компонент, составляющий примерно 10 % массы, — это графитовые сферы радиусом 0,02 мкм. Мы утверждаем, что они образуются путем анаэробного распада биологических частиц подобно тому, как на Земле образуются залежи угля и графита биологического происхождения. Эти частицы вносят основной вклад в поглощение в среднем УФ-диапазоне, включая пик экстинкции при 2200 Å.

На рис. 5 показаны абсорбционные свойства графитовых сфер радиусом 0,02 мкм. Показанный на рисунке широкий пик поглощения, по-видимому, имеет глубокий смысл в теории панспермии. Известно, что ультрафиолетовое излучение при длинах волн около 2600 Å смертоносно для биологических объектов (хотя, конечно, наличие известного процесса энзиматической репарации в клетках при соответствующих условиях роста направлено на расщепление димеров пиримидинов, образовав-

шихся под действием излучения). Живая клетка внутри межзвездного облака в большой степени будет защищена от излучаемого звездами ультрафиолета благодаря влиянию графита. Защита может быть обусловлена как отдельными частицами графита (полностью отмершие клетки) в общей смеси, так и графитизацией поверхности индивидуальных клеток. Действительно, внутренняя часть бактериальной клетки, покрытой слоем любого вида графитного материала толщиной  $\sim 0,1$  мкм, становится практически полностью недоступной для ультрафиолето-

Таблица 1

Предельные условия окружающей среды, ограничивающие рост и размножение микроорганизмов [9]

Фактор	Нижний предел	Верхний предел
Температура	-18 °C (только выживание — до -270 °C)	104 °C (сульфат-редуцирующие бактерии при давлении 1000 атм)
Eh	-450 мВ (при pH = 9,5 для сульфат-редуцирующих бактерий)	+850 мВ (при pH = 3 для железобактерий)
pH	0	> 13
Активность воды ( $a_w$ )	0,65	—
Гидростатическое давление	$\sim 0$	1400 атм (глубоководные бактерии)
Соленость	Бидистиллированная вода	Насыщенные рассолы (бактерии Мертвого моря)
Ионизирующее излучение (выживание после воздействия)		$10^6$ рад

вого излучения. Итак, можно сказать, что биологический материал в космосе сохраняется благодаря медленной и неизбежной деградации некоторой его части, но процесс деградации останавливается при распаде лишь незначительной доли общей массы, составляющей менее 10 %.

В табл. 1, заимствованной из работы [9], показан диапазон переносимости микроорганизмами различных видов экстремальных воздействий со стороны окружающей среды. Температурные воздействия хорошо известны. Способность некоторых видов микроорганизмов выживать после получения больших доз ионизирующего излучения представляет загадку для любой теории, связывающей происхождение жизни с Землей. Атмосфера поглощает практически все рентгеновское излучение низких энергий, являющееся основным источником ионизирующего излучения

в месте нахождения Земли. Такая ситуация, по-видимому, существовала и в более ранние геологические эпохи со времени появления жизни на Земле. Воздействие рентгеновских лучей заключается в образовании разрывов цепей ДНК в ядрах клеток. Наличие в клетках высокоспецифичных ферментов, способных сшивать разорванные цепи, нелегко понять с позиций земной биологии. Так же как и в случае УФ-повреждений, ферменты, осуществляющие репарацию, излишни для земных биологических объектов, но, естественно, жизненно необходимы с точки зрения теории панспермии.

В соответствии с нашей версией этой теории Земля каждый год получает более  $10^{18}$  жизнеспособных клеток в результате отложения кометных частиц в верхней части атмосферы. Хотя значительная часть их погибает, из оставшихся в живых Земля выбирает такие формы, которые наиболее приспособлены для воспроизведения в тех или иных локально преобладающих условиях.

## Литература

1. Arrhenius S. *Worlds in the Making*. Harper and Bros., 1907.
2. Delsemme A. H. См. данный сборник.
3. Helmholtz H. *Populare Wissenschaftliche Vortrage*, Braunschweig, vol. III, p. 101, 1876.
4. Hoyle F., Wickramasingh N. C. *Lifecloud*. J. M. Dent and Sons Limited, London, 1978.
5. Hoyle F., Wickramasingh N. C. *Astrophys. Sp. Sc.*, **66**, 77, 1979.
6. Hoyle F., Wickramasingh N. C. *Astrophys. Sp. Sc.*, **72**, 247, 1980.
7. Hoyle F., Wickramasingh N. C. *Space travellers: the bringers of life*. University College Cardiff Press, 1981.
8. Pflug H. D. *Nature*, **280**, 483, 1979. Также частное сообщение.
9. Vallentyne J. R. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **108**, Part 2, 342, 1963.
10. Wickramasingh D. T., Allen D. A. *Nature*, **287**, 518, 1980.

# Экстремальные условия: существуют ли пределы приспособляемости живых организмов?

Д. Кушнер<sup>1)</sup>

Многие микроорганизмы способны расти в условиях, представляющихся нам экстремальными: вода в состоянии кипения или замерзания, крайние значения рН, концентрации солей, интенсивности радиации и других параметров окружающей среды. Если не считать утонченных приспособительных признаков, то основные механизмы жизненных процессов в экстремальных условиях представляются идентичными механизмам более «нормальной» жизни. Однако диапазон условий, в которых могут развиваться микроорганизмы, видимо, все же ограничен. Для всех микроорганизмов требуется относительно большое количество жидкой воды. В толще льда, или при активности воды  $a_w < 0,6$ , рост не происходит, хотя живые организмы могут переносить гораздо больший холод и большую сухость в течение многих лет. Если только кометы не содержат значительного количества жидкой воды, жизнь, подобная той, которую мы знаем, вероятно, не может на них ни существовать, ни возникнуть.

Тема этой статьи, несомненно, хорошо отражена в недавних обзорах [2, 9, 10, 18, 19], хотя последние обращены в основном к аудитории, взгляды которой отличаются от убеждений участников данной конференции. «Нормальный» микробиолог, особенно медицинский, полагает, что микробная жизнь существует в условиях достаточно благоприятных; в крови млекопитающих или богатом питательными веществами бульоне, при нейтральных значениях рН, атмосферном давлении и температурах, близких к температуре человеческого тела. Для такого микробиолога организмы, живущие в кипящей или замерзающей воде, насыщенном растворе соли, сильно кислых или щелочных растворах или в океанских глубинах при давлении более 1000 атмосфер, и впрямь находятся в экстремальных условиях. Однако, как показано в других статьях этого сборника, специалист по кометам имеет дело с условиями, гораздо более неблагоприятными для клеточного роста, чем условия в любом месте на Земле: холод, близкий к абсолютному нулю, крайне низкое давление и интенсивная бомбардировка излучениями.

<sup>1)</sup> Биологический факультет Оттавского университета, Оттава, пров. Онтарио, Канада.

Что могут исследования жизни микроорганизмов в экстремальных условиях окружающей среды на Земле сообщить нам о возможности существования такой жизни на кометах или о возможности возникновения там каких-либо форм жизни? По крайней мере они позволяют установить те предельные условия окружающей среды, которые могут выдержать живые существа. В табл. 1 приведены некоторые диапазоны условий окружающей среды, в которых возможен рост микроорганизмов.

Давно известно, что определенные бактерии могут расти при температуре кипящей воды или при близких температурах [16, 21]. Фотосинтезирующие прокариотические микроорганизмы способны расти при температурах, несколько более низких, чем гетеротрофные, а эукариотические микроорганизмы растут при еще более низких температурах. Способность выдерживать очень высокие температуры связана, видимо, с более простой структурой клетки.

Хотя высокотемпературные условия сами по себе представляют большой интерес, они, вероятно, более присущи первичной Земле, чем кометам. К теме данной конференции в большей мере относится способность микроорганизмов расти при низких температурах. Если организмы растут при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  или около того, это означает, что их ферменты, системы транспорта, регуляции и другие важнейшие части клеточной деятельности обладают способностью функционировать при указанных температурах [7, 8, 16]. Хотя эти приспособительные механизмы представляют интерес и весьма хитроумны, количество и разнообразие видов, включающее микроорганизмы и более сложные формы, растущие при таких низких температурах, свидетельствуют о том, что эти механизмы вырабатываются весьма легко. На самом деле вопрос заключается не в том, почему «психрофилы» могут расти при  $0^{\circ}\text{C}$ , а в том, почему «мезофилы» не могут.

При более низких температурах (ниже  $0^{\circ}\text{C}$ ) самый низкий температурный предел роста микроорганизмов определяется потребностью в *жидкой* воде. Сообщалось, что некоторые микроорганизмы растут на замороженных пищевых продуктах при температурах  $-30^{\circ}\text{C}$ . Однако в этих продуктах имеются небольшие полости, заполненные насыщенным водным раствором растворимых компонентов, замерзающим в точке эвтектики, гораздо ниже нуля. Сообщения о росте микроорганизмов при столь низких температурах основаны на фактах порчи продуктов, находящихся в морозильных камерах в течение длительного времени. Возможно, однако, что в этих случаях не всегда поддерживалась минимальная температура [15]. Критическая оценка имеющихся данных приводит к предположению, что

микроорганизмы никогда не растут при  $-18^{\circ}\text{C}$ , и самая низкая температура, для которой подтвержден рост микроорганизмов, составляет  $-12^{\circ}\text{C}$  [14, 15].

Мне неизвестны твердо установленные случаи роста микроорганизмов *во льду* (хотя многие микроорганизмы могут расти в тонкой пленке воды на его поверхности). Если учесть, какие большие запасы льда имеются на Земле, неспособность микроорганизмов расти в его толще наглядно демонстрирует их потребность в жидкой воде.

Наличие жидкой воды в доступном состоянии является, видимо, самым жестким фактором окружающей среды, ограничивающим рост. Диапазон значений активности воды<sup>1)</sup>, допускающих рост (1,00—0,6), по-видимому, более узок, чем диапазон, скажем, температур (261—373 К) и в особенности значений рН, концентраций ядовитых веществ или интенсивностей излучений. До сих пор никто не нашел каких-либо микроорганизмов, которые в лабораторных условиях росли бы при активности воды  $a_w$  менее 0,6. Хотя микроорганизмы растут в очень сухих местах, включая сухие долины Антарктики [1, 22], этот рост, вероятно, связан с наличием небольших скоплений воды в почве или на скалах. Психрофильные дрожжи, выделенные из образцов, взятых в антарктических сухих долинах, способны расти даже в умеренно концентрированных растворах NaCl или глицерина [23]. Лишайники могут выживать и сохранять активность в очень сухих условиях на поверхности скал; очевидно, эта способность обусловлена накоплением внутриклеточных полиолов в период относительного обилия влаги, что позволяет лишайникам поддерживать нужный уровень содержания внутриклеточной воды в более сухие периоды [20].

Микроорганизмы, растущие в крепких растворах солей или сахаров, также находятся в условиях низкой активности воды. Некоторые соленые озера и солеварни, в которых «солнечная соль» выделяется при выпаривании морской воды, содержат насыщенный раствор NaCl. Это не единственная соль, имеющаяся в изобилии в природных соленых озерах. В некоторых из них встречается также очень высокое содержание ионов  $\text{Mg}^{2+}$  [11]. Содержание  $\text{Mg}^{2+}$  в Мертвом море повышается по мере того, как этот водоем продолжает испаряться. Сейчас оно составляет около 2 М; организмы, выделенные недавно из вод Мертвого моря, проявляют потребность в значительных количествах  $\text{Mg}^{2+}$ , а также NaCl (М. Шайло, частное сообщение).

Хотя крайне галофильные бактерии — это далеко не единственные микроорганизмы, выделенные из подобных мест, бога-

<sup>1)</sup> Активность воды определяется как  $a_w = p_{\text{раствор}}/p_{\text{вода}}$ , где  $p$  — давление пара. Влияние  $a_w$  на рост микроорганизмов подробно рассматривается в [6, 11, 14] и других работах.

тых солями, они изучены в наибольшей степени. Эти бактерии представляют особый интерес, поскольку проявляют очень высокую степень адаптации. Виды *Halobacterium*, растущие в насыщенном растворе NaCl, могут содержать внутри клетки насыщенный раствор KCl, а также меньшие количества NaCl и других растворенных веществ. Многие из важнейших для организма процессов, включая транспорт, активность ферментов и синтез белка, оказываются приспособленными к столь необычным условиям [11]. По-видимому, в эволюционном плане эти организмы отличаются от большинства других бактерий. Изучение последовательностей оснований и аминокислот в их нуклеиновых кислотах и белках приводит к предположению, что они родственны термоацидофильным и метанообразующим бактериям — организмам, с которыми у них очень мало общего, если не считать «экстремальных» условий обитания. Эти группы микроорганизмов получили название *Archaeobacteria* [24], подразумевающее раннее возникновение; так это или нет, но рассматриваемая группа организмов, несомненно, эволюционировала иным путем, нежели другие бактерии.

Но даже и столь необычные организмы, как крайние галофилы, имеют те же *типы* ферментных систем и механизмы регуляции активности ферментов, что и более «нормальные» микроорганизмы [11]. Например, аспартаттранскарбамилаза (АТКаза) *Halobacterium cutirubrum* ингибируется ЦТФ, так же, как и АТКаза *Escherichia coli*. АТКаза дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* ингибируется УТФ. АТКаза *H. cutirubrum* для активности и ретроингибирования требует очень высокой концентрации соли; оба процесса ингибируются для дрожжевой АТказы умеренно высокой концентрацией соли [13]. Хотя таких систем изучено немного, примеры аллостерических ингибиторов и активаторов, как и характер обнаруженных у них общих метаболических процессов, приводят к предположению, что, если не считать потребности в высоких концентрациях соли, крайние галофилы используют те же основные биохимические механизмы, что и другие бактерии [11]. Возможно, даже самые «экстремальные» микроорганизмы по существу не так уж отличаются от более «нормальных» форм жизни.

Хотя в воде растворимо значительное количество NaCl,  $a_w$  такого раствора может понизиться лишь до 0,75. Другие соли могут привести к более существенному понижению активности воды. Например, некоторые озера в Антарктике содержат насыщенный раствор  $CaCl_2$  с активностью воды 0,45. Присутствие в этих озерах бактерий вызвало несколько лет тому назад определенный интерес. Однако затем было обнаружено, что бактерии не могут расти в воде этих водоемов; по-видимому, они были занесены туда извне [6].

У нас нет возможности подробно обсуждать другие примеры сопротивляемости суровым внешним условиям, приведенные в табл. 1. Любопытно, что микроорганизмы, видимо, лучше выдерживают высококислотную, чем высокощелочную среду. Пока не найдено микроорганизмов, способных расти при значениях рН выше 11,5 [3]. Это может быть связано с трудностью поддержания наружного градиента протонов в щелочной среде [4].

Особый интерес на данном симпозиуме представляет еще одна разновидность сопротивляемости, а именно сопротивляемость радиации. Любая живая форма, прибывающая из открытого космоса, должна подвергаться интенсивному облучению. У наиболее изученных земных микроорганизмов сопротивляемость ультрафиолетовому и ионизирующему излучению, по-видимому, зависит от способности исправлять причиняемые ими повреждения. Починка включает ферментативное расщепление димеров пиримидина или вырезание поврежденной ДНК и ресинтез новой ДНК [17]. Эти процессы почти обязательно требуют наличия жидкой воды (см. также [14]). Как отмечалось в других материалах данного симпозиума (см., например, статью Гринберга), внешние условия комет включают непрерывное облучение, которое, вероятно, неблагоприятно для образования живых клеток. Из-за низких температур вряд ли можно ожидать, что внутри комет действуют те же механизмы радиационной устойчивости, что и на Земле.

До сих пор мы обсуждали возможность микроорганизмов *расти* при различных экстремальных внешних условиях. Следует также рассмотреть их способность *выживать*, не проявляя роста. Это необходимо для того, чтобы предсказать, могут ли формы жизни, возникающие в одной части Вселенной, сохраняться при переносе в другую ее часть. Конечно, микроорганизмы могут длительное время переносить замороженное состояние; проблемы выживания при температурах ниже нуля Цельсия заключается в том, чтобы избежать гибели при замораживании или оттаивании [14]. Споры бактерий, водоросли, грибы и более высокие формы жизни способны выживать и нормально расти, будучи подвергнуты охлаждению до столь низкой температуры, как 0,008 К [5]. Говорят, что замороженные культуры в лаборатории выживают «практически бесконечно долго», что на деле означает несколько лет. Имеется не так уж много данных по выживанию замороженных микроорганизмов в течение значительно более длительных сроков. Напротив, оценки содержания микроорганизмов в почвах гербариев свидетельствуют о том, что время гибели бактериальных эндоспор составляет 50—100 лет [12]. Семена растений в замороженных осадках могут выживать в течение нескольких тысяч лет [5].

Таблица 1

## Некоторые ограничения внешних условий для жизни микроорганизмов

Условия		Примеры микроорганизмов, растущих в данных условиях
Высокие температуры (горячие источники, вулканические почвы, компостные кучи)	45—100 °С	Эукариотические клетки ≤ 60 °С Фотосинтезирующие прокариоты ≤ 70 °С Нефотосинтезирующие прокариоты ≤ 100 °С
Кислые горячие источники	pH 1, 90 °С	<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>
Низкие температуры (океаны, поверхность снега и льда, пещеры, рефрижераторы и морозильные камеры)	от -20 (?) до 30 °С	Многие «психрофильные» дрожжи и бактерии
Кислые и щелочные условия (горячие источники, щелочные озера и почвы, некоторые жидкие промышленные стоки, кислые рудничные воды, отвалы угольных шахт)	pH 1—5	<i>Thiobacillus</i> и <i>Acetobacter</i> spp.; эукариотические водоросли
	pH 4—8	Многие бактерии и другие микроорганизмы
	pH 8—11	<i>Bacillus circulans</i> и другие бактерии; <i>Ectothiorhodospira halophila</i> , сине-зеленые водоросли
Солевые растворы NaCl	pH 2—10	<i>Penicillium</i> и другие грибы
	0,01 М	Многие микроорганизмы
	0,3 М	Морские микроорганизмы
	0,3—3,0 М	Умеренные галофилы (некоторые из них — морские)
	2,5—5,0 М 0—5,0 М	Крайние галофилы Солеустойчивые микроорганизмы
Низкая активность воды $a_w$ (в концентрированных растворах сахара или соли, или на поверхностях в сухой атмосфере)	1,00—0,95	Многие микроорганизмы
	0,88—0,75	Крайние галофилы
	0,97—0,65	<i>Xeromyces bisporus</i>
	1,00—0,60	<i>Saccharomyces rouxii</i>
Радиация — доза, соответствующая примерно 37 % выживаемости для УФ (эрг/мм <sup>2</sup> ) и ионизирующего излучения (кР)		<i>Escherichia coli</i> 500 2
		<i>Saccharomyces rouxii</i> 800 3
		<i>Bodo marina</i> 50 000 —
		<i>Micrococcus radiodurans</i> 6000 150
Тяжелые металлы (кислые рудничные воды, лабораторные реагенты)		Многие микроорганизмы ингибируются низкими концентрациями (10 <sup>-5</sup> —10 <sup>-6</sup> М) тяжелых металлов; некоторые (например, тубациллы) растут в 1 %-ном растворе меди; некоторые грибы растут в насыщенном растворе CuSO <sub>4</sub>

**Примечание:** В таблице приведены приблизительные значения и некоторые примеры, взятые по большей части из статей [9, 10]. Другие природные условия, которые следует назвать «экстремальными», включая высокое давление, низкое содержание питательных веществ, аэробные и анаэробные условия, рассмотрены в статье [9].

Скудная информация, которой мы располагаем, не позволяет считать, что прокариоты выдерживают длительное время условия очень низких температур и отсутствия воды лучше, чем эукариоты. В любом случае можно ожидать, что они могут выживать в течение сотен или тысяч лет. Поэтому путешествие живых форм на Землю с других небесных тел представляет меньшую проблему, чем их возникновение на таких телах.

В заключение отметим, что микроорганизмы способны выносить впечатляющее разнообразие земных условий. Однако даже и на нашей Земле существуют ограничения в отношении их роста. Для жизни нужна вода, точнее жидкая вода, поскольку организмы, видимо, не растут в твердом льду. Если микроорганизмы заселяют очень сухие области, они могут концентрировать доступную им воду, или живут в нишах, где она время от времени собирается. По-видимому, ограничения внешних условий для живых организмов действительно существуют. Можно предсказать, что, если только кометы каким-то образом не ухитряются содержать значительные количества жидкой воды, жизнь, по крайней мере в знакомой нам форме, не может в них ни существовать, ни, вероятно, возникнуть.

## Литература

1. *Friedmann I. E.* *Origins of Life*, 10, 223, 1980.
2. *Gould G. W., Corry J. E. eds.* *Microbial Growth and Survival in Extremes of Environment*, Academic Press, London, 1980.
3. *Grant W. D., Tindall B. J. In: Microbial Growth and Survival in Extremes of Environment/G. W. Gould, J. E. L. Corry eds.*, Academic Press, London, 27—36, 1980.
4. *Guffanti A. A., Susman P. S., Blanco R., Krulwich T. A. J. Biol. Chem.*, 253, 708, 1978.
5. *Hinton H. E. Proc. Roy. Soc. B.*, 171, 43, 1968.
6. *Horowitz W. H. In: Chemical evolution in the giant planets/C. Ponnampereuma ed.* Academic Press, New York, 121—128, 1976.
7. *Inniss W. E., Ingram J. D. In: Microbial life in extreme environments/D. J. Kushner ed.*, Academic Press, London, 73—104, 1978.
8. *Kushner D. J. In: Chemical evolution in the giant planets/C. Ponnampereuma ed.*, Academic Press, New York, 85—93, 1976.
9. *Kushner D. J. In: Contemporary microbial ecology/D. C. Ellwood, J. N. Hedger, M. J. Latham, J. M. Lynch, J. N. Slater, eds.* Academic Press, New York, 29—54, 1980.
10. *Kushner D. J. ed.* *Microbial life in extreme environments.* Press, London, 1978.
11. *Kushner D. J. In: Microbial life in extreme environments./D. J. Kushner ed.* Academic Press, London, 318—368, 1978.
12. *Lewis J. C. In: The bacterial spore/G. W. Gould, A. Hurst, eds.* Academic Press, London, 301—358, 1969.
13. *Liebl V., Kaplan J. G., Kushner D. J. Can. J. Biochem.*, 47, 1095, 1969.
14. *Mazur P. Origins of Life*, 10, 137, 1980.
15. *Michener H. D., Elliott R. P. Adv. Food Res.*, 13, 349, 1964.
16. *Morita R. Y. Origins of Life*, 10, 215, 1980.

17. *Nasim A., James A. P.* In: Microbial life in extreme environments/*D. J. Kushner ed.*, Academic Press, London, 409—440, 1978.
18. *Ponnamperuma C., Margulis L.* eds. Limits of Life. D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1980. (Статьи этого сборника опубликованы также в т. 10 журнала *Origins of Life.*)
19. *Shilo M.* ed. Strategies of microbial life in extreme environments. Verlag Chemie, Weinheim, New York, 1979.
20. *Smith D. C.* In: Strategies of microbial life in extreme environments/*M. Shilo ed.*, Verlag Chemie, Weinheim, New York, 291—303, 1979.
21. *Tansey M. R., Brock T. D.* In: Microbial life in extreme environments/*D. J. Kushner ed.*, Academic Press, London, 159—216, 1978.
22. *Vishniac H. C., Hempfling W. J.* *Gen. Microbiol.*, **112**, 301, 1979.
23. *Vishniac H. C., Hempfling W.* *Int. J. Syst. Bacteriol.*, **29**, 153, 1979.
24. *Woese C. R., Magrum L. J., Fox G. E.* *J. Mol. Evol.*, **11**, 245, 1978.

## Содержание

Предисловие редакторов перевода . . . . .	5
Предисловие . . . . .	8
Природа комет. <i>Ф. Л. Уинпл</i> . . . . .	9
Ядра комет: характеристики и гипотезы о происхождении и строении. <i>Б. Донн</i> . . . . .	29
Исследования спектров комет в ультрафиолете. <i>П. Д. Фельдман</i> . . . . .	38
Расчеты спектров кометных молекул из условий статистического равновесия. <i>К. Свами</i> . . . . .	50
Относительное содержание химических веществ в кометах. <i>М. Ф. А'Херн</i> . . . . .	59
Межпланетная пыль — ее физическая природа и вход в атмосферы планет земной группы. <i>Д. Е. Браунли</i> . . . . .	69
Взаимодействие комет с межпланетной средой. <i>Д. А. Мендис</i> . . . . .	78
Химическая кинетика в коме. <i>У. Ф. Хюбнер</i> . . . . .	96
Химическая эволюция межзвездной пыли как возможный источник предбиологического материала. <i>Дж. М. Гринберг</i> . . . . .	109
Стабильные изотопы в исследовании проблемы «Кометы и происхождение жизни». <i>П. Эйбелл, Э. Фаллик, Н. Мак-Нафтон, К. Пиллинджер</i> . . . . .	128
Существует ли связь между кометами и происхождением жизни? <i>А. Дельземм</i> . . . . .	139
Кометы и фотохимия палеоатмосферы. <i>Дж. С. Левин, Т. Р. Августсон, Р. Е. Боунер, М. Натараджан, Л. Дж. Сакс</i> . . . . .	161
Кометное вещество и происхождение жизни на Земле. <i>А. Ласкано-Араухо, Дж. Оро</i> . . . . .	186
Кометы — средство передвижения в теории панспермии. <i>Ф. Хойл, Ч. Викрамасингх</i> . . . . .	210
Экстремальные условия: существуют ли пределы приспособляемости живых организмов? <i>Д. Кушнер</i> . . . . .	220

### УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2, изд-во «Мир».

## КОМЕТЫ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ

Под редакцией Сирила Поннамперумы

Научный редактор М. Ф. Путов  
Мл. научный редактор В. Н. Соколова  
Художник Н. Н. Дронова  
Художественный редактор М. Н. Кузьмина  
Технический редактор В. П. Сизова  
Корректор Т. И. Стифеева

ИБ № 3979

Сдано в набор 13.02.84. Подписано к печати 21.06.84. Формат 60×96<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Объем 7,25 бум. л. Усл. печ. л. 14,50. Усл. кр.-отг. 14,50. Уч.-изд. л. 14,48.  
Изд. № 27/3203. Тираж 6 800 экз. Зак. 1268. Цена 2 р. 30 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2.

Отпечатано с матриц Ленинградской типографии № 2 головного предприятия ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29 в Ленинградской типографии № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

## Книги издательства «Мир» в 1985 году

**РОУЗВЕР Н. Т. ПЕРИГЕЛИЙ МЕРКУРИЯ. ОТ ЛЕВЕРЬЕ ДО ЭЙНШТЕЙНА:** Пер. с англ.—М.: Мир, 1985, 15 л., ил.—90 к. 10 000 экз.

В середине XIX в. знаменитый французский астроном Леверье доказал, что Меркурий не подчиняется закону тяготения Ньютона — его перигелий, ближайшая к Солнцу точка орбиты, дополнительно смещается на 43 угловые секунды в столетие. Истории открытия и попыток объяснения загадки перигелия Меркурия, завершившейся лишь с созданием Эйнштейном теории относительности, посвящена книга известного английского историка науки.

Для читателей, интересующихся проблемами современной науки.

### Содержание:

1. Введение
2. Леверье и аномальное смещение перигелия Меркурия
3. Ньютон и гипотеза Холла
4. Гипотеза Зелигера об околосолнечном веществе
5. Теоретические аргументы в пользу закона обратных квадратов
6. Законы, учитывающие зависимость силы тяготения от скорости
7. Общая теория относительности и аномальное смещение перигелия Меркурия

## Книги издательства «Мир» в 1985 году

**Спутники Юпитера.** В 3-х частях. Пер. с англ. Часть 1. 24 л. 3 р. 80 к.

Эта коллективная монография, излагает результаты научных исследований спутников Юпитера с американских космических аппаратов «Вояджер». В ч. 1 вошли разделы, посвященные общим проблемам физики спутников Юпитера и околоюпитерианского пространства, излагаются история открытия, данные наблюдений, сведения о кольцах Юпитера, внешних и внутренних спутниках, общих особенностях их поверхности, о кратерах и кратерообразовании на спутниках. Книга иллюстрируется фотографиями, сделанными с космических аппаратов.

Данное издание рассчитано на астрономов, геологов, планетологов — как специалистов, так и студентов старших курсов. Оно представит интерес для всех интересующихся современным уровнем знаний о Солнечной системе.

Части 2 и 3 выйдут в свет в 1986 году.

Приобрести эту книгу можно во всех магазинах научно-технической литературы.

20516

4275

103  
—  
T

