

Х.АЛЬВЕН  
Г.АРРЕНИУС

# ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

*Перевод с английского*

канд. физ-мат. наук К. В. КРАСНОБАЕВА,  
канд. техн. наук Г. А. МЕРСОВА  
и канд. техн. наук И. В. ОРФАНОВА

*под редакцией*

академика Г. И. ПЕТРОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО "МИР"  
МОСКВА 1979

33-149

# EVOLUTION OF THE SOLAR SYSTEM

HANNES ALFVEN

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO  
AND ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
STOCKHOLM, SWEDEN

GUSTAF ARRHENIUS

SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY  
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

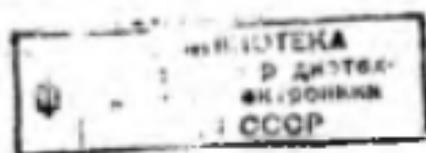
1976

SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
INFORMATION OFFICE  
NATIONAL AERONAUTICS  
AND SPACE ADMINISTRATION  
WASHINGTON, D. C.

Книга Х. Альвена, лауреата Нобелевской премии, иностранного члена АН СССР, и проф. Г. Аррензуса содержит подробное изложение разработанной авторами теории образования и последующей эволюции нашей планетной системы. Эти вопросы представляют исключительный интерес как для развития наших знаний, так и для практики, поскольку они тесно связаны с геологической историей Земли и пониманием ее внутреннего строения. Особое внимание уделено магнитогидродинамическим и другим эффектам в плазме, а также химическим реакциям и процессам конденсации.

Книга представит большой интерес для широкого круга специалистов — астрофизиков, геофизиков, геохимиков, химиков, механиков, а также для лиц, интересующихся достижениями современной науки.

*Редакция литературы по космическим исследованиям,  
астрономии и геофизике*



1705070000

А  $\frac{20004-101}{041(01)-79}$  101-79

© Перевод на русский язык, «Мир», 1979

# Оглавление

От редактора перевода . . . . .	5
Предисловие к русскому изданию . . . . .	8
Предисловие . . . . .	10
1. Введение . . . . .	13
1.1. Фундаментальный подход к проблеме . . . . .	13
1.2. Система планет — системы спутников . . . . .	14
1.3. Пять этапов эволюции . . . . .	15
1.4. Направляющие процессы отдельных этапов эволюции . . . . .	15
1.5. Требования к моделям и ограничения . . . . .	19

## ЧАСТЬ А

### Современное состояние и основные законы

2. Современное строение системы планет и систем спутников . . . . .	21
2.1. Характеристики орбит планет и спутников . . . . .	21
2.2. Физические свойства планет и спутников . . . . .	25
2.3. Спутники с прямым и обратным движением . . . . .	31
2.4. Модель Лапласа и функция распределенной плотности . . . . .	31
2.5. Обсуждение графиков распределенной плотности . . . . .	33
2.6. «Заков» Тициуса — Боде . . . . .	38
3. Движение планет и спутников . . . . .	39
3.1. Метод ведущего центра в задачах небесной механики . . . . .	39
3.2. Круговые орбиты . . . . .	40
3.3. Колебания, видоизменяющие круговую орбиту . . . . .	41
3.4. Движение в гравитационном поле, обратно пропорциональ- ном квадрату расстояния . . . . .	43
3.5. Негармонические колебания и большие эксцентриситеты . . . . .	44
3.6. Движение в поле вращающегося центрального тела . . . . .	46
3.7. Движение планет, возмущаемое другими планетами . . . . .	46
4. Малые тела . . . . .	49
4.1. Обзор и классификация . . . . .	49
4.2. Различия в эволюции больших и малых тел . . . . .	50
4.3. Главный пояс астероидов . . . . .	51

4.4. Астероиды групп Гильды и Венгрии . . . . .	61
4.5. Троянцы . . . . .	62
4.6. Семейство комет — метеорных тел . . . . .	62
5. Силы, действующие на малые тела . . . . .	68
5.1. Введение . . . . .	68
5.2. Гравитационные воздействия . . . . .	68
5.3. Электромагнитные эффекты . . . . .	70
5.4. Граница между движениями, обусловленными гравитационными и электромагнитными силами . . . . .	71
5.5. Радиационные эффекты . . . . .	73
5.6. Выводы . . . . .	76
6. Кеплеровское движение взаимодействующих тел: струйные потоки . . . . .	77
6.1. Введение . . . . .	77
6.2. Межпланетная среда . . . . .	78
6.3. Эффекты столкновений . . . . .	79
6.4. Простая модель струйного потока . . . . .	80
6.5. Выводы из модели струйного потока . . . . .	82
6.6. Струйный поток и отрицательная диффузия . . . . .	83
6.7. Простая модель отрицательной диффузии . . . . .	84
6.8. Продолжительность сжатия струйного потока . . . . .	87
6.9. Столкновения частиц со струйным потоком . . . . .	89
6.10. Струйные потоки как небесные объекты . . . . .	92
7. Столкновения: фрагментация и аккреция . . . . .	93
7.1. Образование малых тел: фрагментация и аккреция . . . . .	93
7.2. Распределение по размерам . . . . .	95
7.3. Три простых модели . . . . .	97
7.4. Переход от фрагментации и аккреции . . . . .	101
8. Резонансные структуры в Солнечной системе . . . . .	105
8.1. Резонансы в Солнечной системе . . . . .	105
8.2. Резонанс и колебания маятника . . . . .	107
8.3. Простая модель резонанса . . . . .	109
8.4. Отклонения от точного резонанса . . . . .	111
8.5. Резонанс между орбитальными движениями . . . . .	112
8.6. Пропалы Кирквуда . . . . .	121
8.7. Об отсутствии резонансных явлений в системе колец Сатурна . . . . .	121
8.8. Резонансы между вращением и орбитальным движением . . . . .	122
8.9. Почти-соизмеримости . . . . .	123
9. Вращение и приливы . . . . .	125
9.1. Приливы . . . . .	125
9.2. Амплитуда приливов . . . . .	125
9.3. Приливное торможение вращения центрального тела . . . . .	127
9.4. Торможение вращения планет приливами, вызываемыми спутниками . . . . .	129
9.5. Торможение вращения планет солнечными приливами . . . . .	132
9.6. Эволюция спутников планет под действием приливов . . . . .	133
9.7. Изохронность вращений . . . . .	134
9.8. Выводы из изохронности вращений . . . . .	136
10. Постаккреционные изменения в Солнечной системе . . . . .	138
10.1. Устойчивость орбит . . . . .	139
10.2. Резонанс и устойчивость . . . . .	139
10.3. Устойчивость колец Сатурна и пояса астероидов . . . . .	140
10.4. Постоянство осевых вращений . . . . .	141
10.5. К возможности реконструкции гетерогенных процессов . . . . .	142

## ЧАСТЬ В

## Аккреция небесных тел

Процессы аккреция . . . . .	144
11.1. Содержащие части В . . . . .	144
11.2. Гравитационный коллапс газового облака . . . . .	145
11.3. Планетезимальная аккреция: аккреция путем захвата ча- стиц или газа . . . . .	150
11.4. Гравитационная аккреция . . . . .	151
11.5. Негравитационная аккреция . . . . .	152
11.6. Аккреция резонансно захваченных зерен . . . . .	154
11.7. Необходимые свойства процесса аккреции . . . . .	156
11.8. Современное состояние астероидов, метеорных тел и комет и гипотеза взорвавшейся планеты . . . . .	159
Об аккреции планет и спутников . . . . .	162
12.1. Планетезимальная аккреция . . . . .	162
12.2. Струйный поток как промежуточная стадия в образовании планет и спутников . . . . .	163
12.3. Аккреция зародыша . . . . .	165
12.4. Баланс массы струйного потока . . . . .	168
12.5. Энергетический баланс в струйном потоке . . . . .	169
12.6. Аккреция при постоянной скорости поступления вещества в струйный поток . . . . .	170
12.7. Замечание . . . . .	172
12.8. Численные значения . . . . .	173
12.9. Выводы относительно различных типов аккреции . . . . .	173
12.10. Распределение температуры тела на ранней стадии его су- ществования . . . . .	176
12.11. Выводы о распределении температуры планет . . . . .	177
12.12. Фронт тепловых пятен аккреции . . . . .	179
12.13. Дифференциация вещества, обусловленная тепловым фронтом аккреции . . . . .	180
Вращение в аккреции . . . . .	182
13.1. Соударения зерен и собственное вращение зародыша . . . . .	182
13.2. Аккреция с круговых орбит на негравитирующий зародыш . . . . .	183
13.3. Гравитационная аккреция . . . . .	185
13.4. Теория аккреции Джули . . . . .	187
13.5. Статистическая теория аккреции . . . . .	191
13.6. Аккреция в струйных потоках и собственное вращение пла- нет . . . . .	192
Взаимосвязи между кометами и метеорными телами . . . . .	197
14.1. Основные проблемы . . . . .	197
14.2. Положительная и отрицательная диффузия; метеорные пото- ки как струйные потоки . . . . .	197
14.3. Механизм аккреции в метеорных потоках . . . . .	199
14.4. Наблюдения образования комет в метеорных потоках . . . . .	200
14.5. Долго- и короткопериодические кометы . . . . .	200
14.6. Выводы о природе комет, основанные на эмиссионных ха- рактеристиках . . . . .	202
14.7. Аналогии между потоками комет и астероидов . . . . .	203
14.8. Сравнение с аккрецией планет и спутников . . . . .	205

## ЧАСТЬ В

## Плазма и конденсация

15. Физика плазмы и гетегония . . . . .	206
15.1. Краткое содержание частей А и Б и план частей В и Г . . . . .	206
15.2. Связь между экспериментальной и теоретической физикой плазмы . . . . .	209
15.3. Первое и второе приближения в физике космической плазмы . . . . .	211
15.4. Стратегия анализа гетегонной плазмы . . . . .	218
15.5. Требуемые свойства модели . . . . .	222
15.6. Некоторые существующие теории . . . . .	223
16. Модель гетегонной плазмы . . . . .	227
16.1. Намагниченное центральное тело . . . . .	227
16.2. Момент количества движения . . . . .	228
16.3. Перенос момента количества движения . . . . .	230
16.4. Удержание первичного облака . . . . .	236
16.5. Плазма как переходное состояние . . . . .	237
16.6. Выводы относительно модели . . . . .	238
16.7. Гетегонные туманности . . . . .	240
16.8. Эффекты облучения . . . . .	243
16.9. Модель и принцип гетегонии . . . . .	244
17. Перенос момента количества движения и конденсация зерен . . . . .	248
17.1. Изоротация Феррари и частичная коротация . . . . .	248
17.2. Частичная коротация плазмы в магнитном и гравитационном полях . . . . .	249
17.3. Плазма в состоянии частичной коротации . . . . .	252
17.4. Замечание . . . . .	253
17.5. Конденсация плазмы: закон двух третей . . . . .	255
17.6. Выделение энергии при переносе момента количества движения . . . . .	257
18. Аккреция продуктов конденсация . . . . .	259
18.1. Общий обзор . . . . .	259
18.2. Эволюция орбит вследствие столкновений . . . . .	260
18.3. Предел Роша . . . . .	262
18.4. Модель эволюции орбит . . . . .	264
18.5. Аккреция в пределах $r_{MH}$ . . . . .	265
18.6. Структура колец Сатурна . . . . .	266
18.7. Аккреция за пределом $r_{MH}$ . . . . .	274
18.8. Образование пояса астероидов . . . . .	275
18.9. Выводы о частичной коротации . . . . .	277
18.10. Образование спутников и планет . . . . .	278
18.11. Аккреция летучих веществ . . . . .	281
19. Транспланетная конденсация . . . . .	284
19.1. Межпланетная и транспланетная конденсация . . . . .	284
19.2. Граница между межпланетным и транспланетным пространством . . . . .	285
19.3. Конденсация тел на почти-параболических орбитах . . . . .	285
19.4. Тела с долгопериодическими орбитами . . . . .	287
19.5. Диффузия почти-параболических орбит: сближения с планетами . . . . .	288
19.6. Генетические связи комплекса комет — метеорных тел . . . . .	288
19.7. Выводы о семействах метеорных тел . . . . .	290
19.8. Геналогия тел в Солнечной системе . . . . .	291

## ЧАСТЬ Г

Физическая и химическая структура  
Солнечной системы

20. Химическая структура Солнечной системы . . . . .	294
20.1. Обзор . . . . .	294
20.2. Источники информации о химическом составе . . . . .	295
20.3. Дифференциация химического состава до и после аккреции тел в Солнечной системе . . . . .	296
20.4. Неизвестные состояния вещества . . . . .	297
20.5. Состав планет и спутников . . . . .	310
20.6. Состав Солнца . . . . .	313
20.7. Регулярность объемных плотностей в Солнечной системе . . . . .	318
21. Распределение массы и критическая скорость . . . . .	323
21.1. Распределение массы в Солнечной системе . . . . .	323
21.2. Пояса вторичных тел в зависимости от гравитационной потенциальной энергии . . . . .	325
21.3. Сравнительное изучение групп вторичных тел . . . . .	328
21.4. Теоретические предпосылки для образования поясов . . . . .	334
21.5. Попытки интерпретации поясной структуры . . . . .	334
21.6. Три возражения . . . . .	337
21.7. Понятие «критической скорости» . . . . .	337
21.8. Эксперименты по критической скорости . . . . .	338
21.9. Теория критической скорости . . . . .	346
21.10. Выводы относительно критической скорости . . . . .	347
21.11. Химический состав выпадающего газа . . . . .	348
21.12. Химический состав Солнечной системы и размещение неод- нородной плазмы . . . . .	353
21.13. Изменение расстояния ионизации для критической скоро- сти из-за взаимодействия с плазмой в состоянии частичной коротации . . . . .	361
22. Метеориты и предшествующие им состояния . . . . .	363
22.1. Интерпретация эволюционных данных, запечатланных в ме- теоритах . . . . .	363
22.2. Источники метеоритов . . . . .	364
22.3. Эффекты селекции . . . . .	366
22.4. Верхние пределы размеров тел, предшествующих метеоритам . . . . .	367
22.5. Предшествующие состояния родительских тел метеоритов . . . . .	368
22.6. Эволюция струйного потока и свойства метеоритов . . . . .	369
22.7. Силы сцепления в метеорном веществе . . . . .	371
22.8. Эволюционная последовательность предшествующих со- стояний метеоритов . . . . .	373
22.9. Возрастные соотношения в эволюции родительских струй- ных потоков метеоритов . . . . .	373
22.10. Общие замечания о данных, зафиксированных в метеоритах . . . . .	381
23. Строение групп вторичных тел . . . . .	383
23.1. Ионизация в процессе размещения плазмы . . . . .	383
23.2. Полная ионизация . . . . .	385
23.3. Частичная ионизация . . . . .	389
23.4. Изменение вращения во время образования вторичных тел . . . . .	390
23.5. Наблюдаемые значения . . . . .	391
23.6. Распределение массы в зависимости от $T_{ion}/t$ . . . . .	393
23.7. Анализ строения групп вторичных тел . . . . .	396
23.8. Полный перечень значений $T_{ion}/t$ для всех тел . . . . .	397
23.9. Завершенность . . . . .	399
23.10. Выводы о модели размещения плазмы . . . . .	402

## ЧАСТЬ Д

## Частные проблемы

24. Происхождение и эволюция системы Земля — Луна . . . . .	404
24.1. Гетеговский подход . . . . .	404
24.2. Сравнение с другими системами спутников . . . . .	405
24.3. Структура нормальной системы спутников Земли . . . . .	406
24.4. Теория захвата . . . . .	410
24.5. Иррегулярная эволюция лунной орбиты . . . . .	413
24.6. Разрушение нормальной системы спутников . . . . .	415
24.7. Аккреция и тепловая структура Луны . . . . .	417
24.8. Состав Луны . . . . .	420
24.9. Выводы . . . . .	420
25. Свойства Солнца на ранней стадии его существования . . . . .	422
25.1. Об использовании данных о Солнечной системе для изучения раннего Солнца . . . . .	422
25.2. Масса Солнца . . . . .	423
25.3. Магнитное поле Солнца . . . . .	423
25.4. Период собственного вращения Солнца . . . . .	424
25.5. Излучение Солнца, солнечный ветер . . . . .	425
25.6. Эффекты выгорания дейтерия на Солнце . . . . .	426
25.7. Замечания об образовании звезд . . . . .	428
26. Происхождение океана и атмосферы Земли . . . . .	431
26.1. Земной океан и образование Солнечной системы . . . . .	431
26.2. Стадии отдаленных предшественников . . . . .	432
26.3. Стадии ближайших предшественников . . . . .	436
26.4. Накопление воды в процессе аккреции Земли . . . . .	440
26.5. Поступление воды в литосферу . . . . .	446
26.6. Океан и система Земля — Луна . . . . .	449
26.7. Итоги и выводы . . . . .	450
27. Межзвездные облака и образование звезд . . . . .	452
27.1. Новый подход к фазке межзвездных облаков . . . . .	452
27.2. Магнитная гидродинамика облаков космической плазмы . . . . .	452
27.3. Образование звезд в облаке пылевой плазмы . . . . .	459
28. Заключительные замечания . . . . .	468
Литература . . . . .	471
Список обозначений . . . . .	491
Предметный указатель . . . . .	500

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и т. п. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рязанский пер., д. 2, изд-во «Мир»

Х. Альен, Г. Арениус  
ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Научный редактор В. А. Панталея  
Мл. научный редактор Г. Д. Леонтьева  
Художник И. А. Шакурова  
Художественный редактор Г. В. Шоткина  
Технический редактор Е. В. Бурмистрова  
Корректор А. Ф. Рыбальченко

ИБ № 1625

Сдано в набор 23.03.1979. Подписано к печати 25.10.1979.  
Формат 60×90 1/16. Бумага типографская № 1.  
Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.  
Объем 16 бум. л. Усл. печ. л. 50. Уч.-изд. л. 51,50. Изд. № 27/6155.  
Тираж 3300 экз. Зак. 0216. Цена 3 р. 60 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
Москва, 1-й Рязанский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7  
«Искра революции» Союзполиграфпрома Государственного комитета  
СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
Москва, 103001, Трехлудный пер., 9.