НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

8/1975

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

22.65
К64

К. Я. Кондратьев

ПОГОДА И КЛИМАТ НА ПЛАНЕТАХ

551.5
К64

Кондратьев К. Я.

К64 Погода и климат на планетах. М., «Знание», 1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 8. Издается ежемесячно с 1971 г.).

В брошюре рассказывается об одной из интереснейших проблем современных космических исследований — изучении погоды и климата на различных планетах. Результаты наблюдений при помощи автоматических межпланетных станций и теоретические исследования условий погоды и климата на Венере, Марсе и Юпитере открывают заманчивые перспективы развития сравнительной метеорологии планет, важной целью которой является использование данных, относящихся к планетам, для более глубокого понимания закономерностей формирования погоды и климата на Земле.

Брошюра рассчитана на инженеров, преподавателей и студентов вузов, учителей, а также на более широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами освоения космоса.

К $\frac{20806-153}{073(02)-75}$ 69—75 551-5

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
Краткие сведения о происхождении и эволюции Солнечной системы 9
Сравнительные характеристики атмосфер планет 17
Некоторые основные физические процессы в атмосферах планет 22
Венера 28
Марс 45
Юпитер 53
Заключение 63
Литература 64

Кондратьев Кирилл Яковлевич

ПОГОДА И КЛИМАТ НА ПЛАНЕТАХ

Редактор Е. Ю. Ермаков. Обложка А. Е. Григорьева. Худож. редактор В. Н. Конюхов. Техн. редактор Т. Ф. Айдарханова. Корректор Р. П. Старцева.

А 08558. Индекс заказа 54208. Сдано в набор 15/V 1975 г. Подписано к печати 16/VII 1975 г. Формат бумаги 84×108 1/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,43. Тираж 61 380 экз. Издательство «Знание». Москва, 101835, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1017. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

© Издательство «Знание», 1975 г.

Введение

Изучение погоды и климата на Земле с давних пор вызывает большой интерес в связи с тем влиянием, которое оказывают метеорологические явления на жизнь и хозяйственную деятельность человека. Именно поэтому к настоящему времени создана и продолжает развиваться глобальная система обычных и спутниковых метеорологических наблюдений, прилагаются большие усилия для осуществления проекта Всемирной службы погоды (ВСП) и Программы исследований глобальных атмосферных процессов (ПИГАП). В связи с подготовкой к осуществлению ПИГАП много внимания уделяется разработке методов прогноза погоды при помощи ЭВМ на срок до 2—3 недель (такова, по-видимому, предельно возможная предсказуемость погоды в обычном смысле). Известные успехи достигнуты в работах по численному моделированию[1] общей циркуляции атмосферы в ее взаимодействии с подстилающей поверхностью (океан, суша, ледяной покров) с целью изучения роли различных физических факторов, определяющих климат и его изменения. Предпринят целый ряд комплексных программ полевых исследований различных процессов, «управляющих» погодой и климатом.

Несмотря на серьезный прогресс, проблема прогноза погоды с двух-трехнедельной заблаговременностью остается, однако, во многом нерешенной. Еще больше неясных вопросов существует в области исследований климата и его изменений. Известный вклад в решение этих вопросов может внести изучение закономерностей погоды и климата на других планетах.

В нашей брошюре мы рассмотрим основные пробле-

[1] Численным моделированием принято называть расчеты при помощи ЭВМ, имеющие целью теоретическое изучение механизмов тех или иных процессов.

мы сравнительной метеорологии планет. Предметом метеорологии планет является изучение закономерностей состава атмосфер (в том числе свойств облаков); их теплового режима и динамики; характеристик поверхностей планет и специфики взаимодействия атмосфер с подстилающей поверхностью. Речь идет, таким образом, о всей той совокупности явлений, которая определяет условия погоды и климата. Поскольку существует взаимосвязь между процессами в нижних (тропосфера) и верхних слоях атмосферы, то в известной мере должны быть рассмотрены и свойства последних.

Решающий вклад в исследования планет внесло осуществление научных программ АМС[1] «Венера», «Марс», «Маринер» и «Пионер». Естественно поэтому, что фактическую основу обсужденных далее результатов составят главным образом данные, полученные АМС, т. е. основное место займут результаты, относящиеся к Венере, Марсу и Юпитеру.

Фундаментальной целью исследований планет и их спутников является решение проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы. Эта проблема имеет не только огромный познавательный аспект. Усилившийся за последние годы интерес к сравнительной планетологии (условимся понимать этот термин в более широком смысле, чем его земной аналог — геологию) определяется не только стремлением глубже понять закономерности происхождения и эволюции планет. Есть в этих исследованиях и другой важный аспект: расширяющиеся сведения об атмосферах и поверхностях других планет позволяют лучше понять закономерности процессов, происходящих в земной атмосфере. Изучение других планет открывает в известном смысле возможность натурного моделирования атмосферных процессов в условиях, которые являются экстремальными по отношению к земным (мощные атмосферы медленно вращающейся Венеры и быстро вращающихся планет-гигантов, тонкая атмосфера Марса, различия химического состава атмосфер и условий образования облачности и т. п.).

Планеты земной группы — Венера, Земля, Марс — во многих отношениях (масса, радиус, плотность и т. д.) обладают ясно выраженными чертами сходства. Однако

[1] Здесь и далее АМС, т. е. автоматическая межпланетная станция.

за последние годы выявился и целый ряд существенных различий между ними. Так, например, результаты прямых измерений при помощи АМС «Венера», а также данные «радиопросвечиваний» с АМС «Маринер» сильно изменили наши представления о Венере. Помимо обнаружения путем прямых измерений гораздо более высокой (около 750°К) температуры поверхности планеты, чем предполагалось ранее, спектроскопические данные свидетельствуют об очень малом содержании водяного пара выше облачного покрова, а радиоастрономические измерения указывают на низкое содержание водяного пара и в основных слоях венерианской атмосферы (по-видимому, общее содержание водяного пара в атмосфере Венеры в 10^3—10^4 раз меньше, чем на Земле). Исключительно важное значение имели впервые осуществленные на АМС «Венера» прямые измерения состава венерианской атмосферы, скорости ветра, освещенности.

Отличительным свойством планеты Венера является очень медленное вращение вокруг своей оси (к тому же противоположное по направлению обращения ее вокруг Солнца). Медленное вращение и связанная с ним малость отклоняющей силы (силы Кориолиса) придает исследованиям Венеры особый интерес с точки зрения аналогии с недостаточно изученной на Земле тропической циркуляцией. Если на Земле замкнутая конвективная циркуляция в форме так называемой ячейки Гадлея[1] ограничивается поясом тропических широт, где сила Кориолиса мала, то на Венере циркуляция этого типа охватывает гораздо бо́льшую часть планетарной атмосферы. Внимание к исследованиям общей циркуляции венерианской атмосферы значительно возросло в связи с неожиданно сложной системой крупномасштабных воздушных течений, обнаруженных в надоблачной атмосфере Венеры по данным АМС «Маринера-10».

Общие черты земной и марсианской атмосферы определяются близкими значениями силы Кориолиса, наличием суточного и сезонного изменений метеорологических параметров, вызванных заметным и почти равным у обеих планет наклонением оси к плоскости их обращения вокруг Солнца. Важные же различия состоят в отсутствии на Марсе океанов, малом содержании во-

[1] Кольцо меридиональной циркуляции с восходящими движениями у экватора и нисходящими — в субтропических широтах.

дяного пара, гораздо меньшей протяженности и большей неустойчивости облачного покрова. Низкая плотность атмосферы Марса вблизи поверхности и преобладание углекислого газа, для которого характерна высокая оптическая активность, определяют в условиях Марса гораздо большее значение радиационных процессов (по сравнению с динамическими) как факторов, определяющих температурный режим поверхности планеты и ее атмосферы и влияющих на общую циркуляцию атмосферы (противоположная ситуация существует на Венере и Юпитере).

Характерной особенностью погоды на Марсе являются пылевые бури, охватывающие иногда (как это было, например, в конце 1971 — начале 1972 г.) всю атмосферу планеты. Возникновение глобальных пылевых бурь и «радиационно-обусловленная» общая циркуляция марсианской атмосферы позволяют рассматривать Марс как экстремальную модель воздействия аэрозольных (пылевых) загрязнений атмосферы на метеорологический режим. Следует в связи с этим отметить важную проблему влияния запыленности земной атмосферы на современный климат и на его изменение, которая привлекает сейчас большое внимание, но все еще остается не решенной, что делает исследования особенностей метеорологического режима запыленной атмосферы Марса особенно актуальными. Большой интерес представляет исследование интенсивных процессов эрозии марсианского грунта.

Обнаружение на Марсе структур поверхности, напоминающих высохшие русла рек, побудило искать объяснение возможностей существования на этой планете в прошлом теплого и влажного климата. Одна из выдвинутых в связи с этим гипотез сводится к предположению (подтверждаемому некоторыми косвенными данными наблюдений) о проявлении в процессе эволюции Марса длительного периода повышенной интенсивности — «вспышки» — Солнечной радиации. Очевидно, что такая «вспышка», если она существовала, должна была вызвать изменения климата также на Земле и других планетах. Это вызывает особый интерес к сравнительной палеоклиматологии (климатам геологического прошлого) планет.

Богатый материал для исследований в плане сравнительной метеорологии дает изучение облаков и условий

их формирования на различных планетах, вклада облачности в формирование парникового эффекта. Неустойчивые облака на Марсе и стабильный глобальный облачный покров на Венере представляют собой примеры резко контрастных ситуаций. Интересно отметить, что наиболее вероятное предположение о верхней части облаков Венеры, как о состоящей из капель раствора серной кислоты, побуждает обсудить аналогию с так называемым слоем Юнге в земной атмосфере[1], основной компонентой которого являются сульфатные соединения. Большой интерес представляет изучение роли ядер конденсации в образовании облаков на различных планетах.

Данные измерений с АМС «Маринер-9» и «Марс-5» обнаружили клочковатое распределение озона в марсианской атмосфере. Слой озона на Марсе характеризуется нестабильностью и пространственной неоднородностью в отличие от устойчивого земного слоя озона, который защищает все живое на Земле от губительного воздействия жесткой ультрафиолетовой радиации. Высказанные за последние годы предположения о том, что массовые полеты сверхзвуковых самолетов в стратосфере могут частично разрушить слой озона, побуждают с особым вниманием изучить закономерности образования и разрушения озона в таких условиях, когда для слоя озона характерны нестабильность и пространственная неоднородность.

Специфической особенностью Марса являются динамичные полярные шапки, состоящие из твердой углекислоты (есть основание предполагать, однако, и наличие «погребенного» на глубинах полярных шапок водяного льда). Их сезонные вариации вызывают изменения содержания углекислого газа в атмосфере и соответственно годовой ход (сезонную изменчивость) атмосферного давления у поверхности с амплитудой 13—14%.

Пристальное внимание ученых привлекают сейчас условия атмосферной циркуляции на Юпитере, где совмещаются условия, характерные для звезды (преимущественно водородный состав атмосферы; наличие внутреннего источника тепла, большая роль конвекции (перемешивания), проявляющаяся в глобальных масштабах) и планеты. Юпитер с его тринадцатью спутниками

[1] Слой стратосферного аэрозоля на высотах 15—25 км.

представляет собой подобие миниатюрной «солнечной системы». Но все же мы резонно называем Юпитер планетой, потому что основной особенностью звезды является достижение на некоторой стадии эволюции столь высокой температуры, при которой может начаться термоядерная реакция. Теоретические расчеты показывают, что это возможно лишь в случае, если масса небесного тела примерно в 80 раз превосходит массу Юпитера. У такого «солнца», лишенного условий для термоядерной реакции, как Юпитер, величина теплового потока от внутренних оболочек примерно в миллион раз меньше, чем эмиссия реального Солнца. Исследования Юпитера как планеты представляют большой интерес, в частности, потому, что здесь, как и на Земле, удобно наблюдать наглядные проявления погоды, изучая динамику облачного покрова по изображениям планеты. Начатые уже давно наземные наблюдения, результаты недавних наблюдений с АМС «Пионер-10» и «Пионер-11» наглядно продемонстрировали, что в этом отношении Юпитер представляет собой пример структуры глобального облачного покрова с высокой степенью осесимметричности по сравнению с условиями на Земле и с большой устойчивостью отдельных элементов этой структуры (Большое Красное Пятно существует, например, уже по крайней мере в течение нескольких столетий). Несомненно, что изучение планеты-гиганта, которая примерно в 11 раз больше Земли, вращается вокруг своей оси в 2,5 раза быстрее, обладает мощной атмосферой и внутренним источником тепла, представляет большой интерес в плане сравнительной метеорологии планет.

Обсуждая конкретные данные, характеризующие особенности погоды и климата на различных планетах, мы продолжим в дальнейшем рассмотрение различных аспектов изучения планет, которые представляют интерес с точки зрения более глубокого понимания закономерностей погоды и климата на Земле. Обратимся в этой связи прежде всего к некоторым сведениям о происхождении и эволюции Солнечной системы и описанию сравнительных характеристик атмосфер и поверхностей планет.

Краткие сведения о происхождении и эволюции Солнечной системы

Как известно, распределение химических элементов в Солнечной системе не является пространственно однородным.

В табл. 1, составленной в основном по данным американских ученых Р. М. Гуди и Д. Уолкера, советских ученых Г. С. Голицына, В. Н. Жаркова, а также с использованием некоторых других сведений, приведены основные астрономические и физические параметры планет. Следует подчеркнуть, что быстро развивающиеся исследования планет вызывают необходимость почти непрерывного уточнения содержания таблиц, подобных этой. Так, например, полученные с АМС «Маринер-10» изображения поверхности Меркурия обнаружили, что она очень близко напоминает лунную: обилием кратеров, слабой эрозией поверхности и наличием «морей», похожих на лунные. Анализ данных инфракрасных измерений, относящихся к дневной и ночной сторонам планеты, привел к выводу, что материал поверхности Меркурия также подобен лунному: он имеет малую плотность и, по-видимому, содержит много кремния, но мало железа. Высокоточные измерения траектории АМС «Маринер-10» показали, что средняя плотность планеты составляет 5,5 г/см^3 (по сравнению с 3,3 г/см^3 для Луны). Поскольку поверхность Меркурия состоит из легких материалов, то это означает наличие у планеты тяжелого ядра, которое, вероятно, содержит много железа, но мало кремния. Таким образом, в отличие от Луны (но подобно Земле) Меркурий представляет собой в высокой степени стратифицированное (расслоенное) небесное тело.

Как видно из табл. 1, по мере удаления от Солнца возрастает доля летучих, легко испаряющихся элементов, и этот факт можно рассматривать как свидетельство в пользу гипотезы о том, что планеты-гиганты и другие небесные тела во внешней части Солнечной системы сформировались при более низких температурах, чем планеты земной группы. Как сейчас принято считать, Солнечная система образовалась из первоначальной туманности — гигантского облака, состоявшего из пыли и газа. Температура в центре этой туманности бы-

Таблица 1

Астрономические и физические параметры планет

Планета	Среднее расстояние от Солнца, 10^9 км	Средний радиус, км	Эксцентриситет орбиты	Наклон плоскости орбиты к плоскости экватора, град.	Период обращения, земных суток	Период обращения вокруг Солнца, земных суток	Масса, 10^{26} г	Средняя плотность, г/см^3	Ускорение силы тяжести, см/с^2	Число спутников	Средняя эффективная температура, °К	Среднее альбедо [2]
Меркурий	58	2437	0,206	0	58,7	88	3,304	5,45	376	0	442	0,09
Венера	108	6050	0,007	< 3	—243 [1]	225	48,62	5,25	888	0	244	0,77±0,07
Земля	150	6371	0,017	23,5	1,00	365	59,8	5,52	981	1	253	0,3
Марс	228	3394	0,093	25,2	1,02	687	6,389	3,94	373	2	216	0,20±0,05
Юпитер	778	69 500	0,048	3,1	0,41	4330	19 100	1,35	2500	13	87	0,5
Сатурн	1430	58 100	0,056	26,8	0,43	10 800	5690	0,69	1120	10	63	0,5
Уран	2870	24 500	0,047	98,0	—0,89 [1]	30 700	877	1,44	975	5	33	0,5
Нептун	4500	24 600	0,009	28,8	0,53	60 200	1030	1,65	1134	2	32	0,5
Плутон	5900	~ 3000	0,247	>50	6,39	90 700	11	—	—	?	43	—

[1] Венера и Уран вращаются вокруг своей оси в направлении, противоположном вращению других планет.
[2] Отражательная способность поверхности планеты.

ла высокой (несколько тысяч градусов по шкале Кельвина), а на периферии — низкой (немногие сотни градусов). Такие различия в температуре должны были сопровождаться сильной изменчивостью состава пыли в зависимости от расстояния до центра туманности. В центре — поблизости от протосолнца — все вещества находились только в газообразной фазе, а на расстоянии порядка 36 млн. км от центра (что составляет примерно $^1/_5$ современного радиуса орбиты Земли) небольшое количество нелетучих материалов могли уже существовать в виде твердых частиц. Начиная с этого расстояния и до современного пояса астероидов пыль представляла собой зерна горных пород с ограниченным содержанием летучих веществ. За пределами пояса астероидов температура была настолько низкой, что такие летучие вещества, как вода, аммиак и метан, могли существовать лишь в твердой фазе, образуя частицы соответствующих «льдов».

Предполагается, что Солнце сформировалось в результате гравитационного сжатия, когда центральная часть нагретой солнечной туманности стала неустойчивой. Аналогичным мог быть и процесс формирования планет-гигантов. Существует также гипотеза образования большого ядра из горных пород и льдов, которое за счет гравитационного притяжения захватывало крупные массы газообразного вещества. Правдоподобие такого рода гипотез определяется схожестью химического состава Солнца и планет-гигантов.

Состав планет земной группы и аналогичных небесных тел существенно изменяется в зависимости от расстояния до Солнца. Эти различия можно объяснить на основе гипотезы равновесной конденсации. Предположим, что состав твердого вещества, из которого образовались планеты, их спутники, астероиды и кометы, определялся химическим равновесием между пылевой и газовой компонентами первоначальной туманности. Исходя из этого предположения можно рассчитать зависимость химического состава твердого вещества от температуры, имевшей место в процессе формирования вещества, если известна относительная концентрация различных химических элементов, составлявших первоначальную туманность. По данным наблюдений, всего лишь 15 элементов составляют 99,996% массы любого образца вещества.

Альтернативная гипотеза неоднородной аккреции[1], объясняющая формирование планет земной группы из первоначальной туманности, в отличие от гипотезы равновесной конденсации не предполагает постоянство температуры при аккумуляции частиц твердого вещества поверхностями планет. В данном случае считается, что во время аккреции происходило быстрое охлаждение. Поскольку состав вещества определяется температурой в процессе аккреции, следствием такого рода неоднородной аккреции должно было стать образование слоев вещества различного состава.

Выводы относительно состава планет и их спутников, полученные на основе двух упомянутых гипотез, которые следует рассматривать как предельные случаи, существенно различны.

Наиболее простым способом проверки этих гипотез является использование данных о составе и структуре наиболее изученной нами планеты — Земли, особенно — сведений о составе углеродсодержащих хондритов — наиболее древних материалов (возраст Земли составляет около 4,6 млрд. лет). Анализ хондритов определенно свидетельствует в пользу гипотезы равновесной конденсации. Так, например, их неизменной компонентой оказывается троилит (FeS), отсутствующий в модели неоднородной аккреции. Интересным является тот факт, что спектры многих астероидов не отличаются от лабораторных спектров хондритов.

Гипотеза равновесной конденсации позволяет легче понять и особенности состава атмосфер планет. Согласно модели неоднородной аккреции, содержание летучих веществ в планетах должно быть равно нулю до тех пор, пока не сконденсируется весь водяной пар. Это означает, что вещество конденсата должно более чем на 60% состоять из воды. Гипотеза равновесной конденсации правильно предсказывает содержание воды на Земле, исключительно сухую атмосферу Венеры и дает для Марса содержание воды, которое в 6 раз больше, чем для Земли (вопрос о воде на Марсе до сих пор остается загадкой). Содержание углерода на планетах одинаково успешно прогнозируют обе модели. Источником кислорода для образования углекислого газа служат,

[1] Т. е. аккумуляции частиц в пространстве или захвата частиц поверхностью планеты вследствие взаимного притяжения.

по-видимому, окислы железа. Предсказываемое моделью равновесной конденсации содержание окислов железа на Венере, Земле и Марсе вполне достаточно для объяснения наблюдаемого на этих планетах содержания углекислого газа. Однако окислы железа отсутствуют в эволюционной цепи, соответствующей гипотезе неоднородной аккреции.

Все основные физические и химические свойства Земли указывают на правильность модели равновесной конденсации, в частности, объясняя наличием серы в ядре Земли ее несколько бо́льшую среднюю плотность, чем Венеры (см. табл. 1). Пока еще нет данных о дефиците серы на Венере по сравнению с Землей. Если на этой планете существует вулканическая активность (подобная земной), то в атмосфере Венеры должен бы быть обнаружен карбонил сульфид (COS), но даже высокочувствительные спектроскопические методы не дали никаких результатов, свидетельствующих о наличии карбонил сульфида.

Модель равновесной конденсации, в частности, хорошо объясняет наблюдаемые различия средней плотности планет земной группы, сформировавшихся при различных температурных условиях в результате гравитационной аккреции, и исключает гипотезу селективной (избирательной) аккреции металлов Меркурием и силикатов — другими планетами. Раскрывая единую взаимосвязь процессов конденсации и аккреции на различных телах Солнечной системы, эта модель открывает пути использования отдельных фактов, относящихся к разным планетам и их спутникам, для более глубокого понимания происхождения и эволюции Солнечной системы. Так, например, наличие или отсутствие газообразных соединений серы в атмосфере Венеры, плотность ядра Марса, электропроводность мантии Каллисто — спутника Юпитера, атмосферное давление у поверхности спутника Сатурна — Титана, радиус и масса спутников Урана — все эти данные имеют важное значение для правильного понимания процессов формирования Солнечной системы вообще и для изучения происхождения состава и структуры нашей собственной планеты в частности.

Сравнительное исследование планет и их спутников — наиболее эффективный путь не только решения фундаментальной проблемы происхождения и эволюции

Солнечной системы, но и установления условий образования планет, принадлежащих другим звездам. Поскольку состав большинства звезд подобен составу Солнца, а современные теории происхождения Солнечной системы указывают на процесс формирования планет, как сопутствующий образованию звезд, то естественно считать, что планеты, подобные имеющимся в Солнечной системе, существуют и у других звезд нашей Галактики, а также остальных галактик.

Решение проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы имеет определяющее значение для ответа на вопрос о происхождении и путях эволюции планетарных атмосфер. Специфика химических и физических свойств атмосфер отражает как особенности условий формирования различных планет, так и различия путей эволюции атмосфер. Так, например, сопоставление состава земной атмосферы и Земли в целом с относительным содержанием элементов в Солнечной системе и космосе вообще дает важные указания о процессах, происходивших при возникновении нашей планеты и ее атмосферы. Отсутствие на Земле благородных газов, помимо тех, которые являются продуктами радиоактивного распада, свидетельствует о том, что Земля сформировалась путем аккреции твердых частиц (благородные газы не могли находиться в твердой фазе при той температуре, которая преобладала в период формирования планеты). Атмосфера и океан с разнообразными растворенными в нем солями возникли в результате дегазации (испускания газов) земной коры — процесса, который продолжается и в настоящее время. Основная компонента дегазации — водяной пар. Общее выделение водяного пара составило около $5 \cdot 10^4$ г/см^2. Гораздо более слабое выделение азота (около 10^3 г/см^2) обеспечило преобладание азота в земной атмосфере вследствие его химической инертности. Небольшое преобладание процессов фотосинтеза над распадом органического вещества обусловило наличие кислорода как в атмосфере так и в связанном виде (в качестве окислителя различных компонентов земной коры). Имеются убедительные доводы в пользу формирования за время геологического периода современных атмосферы и гидросферы. Следовательно, они не являются остатками массивной первоначальной атмосферы.

Продуктами дегазации твердых оболочек являются,

по-видимому, также атмосферы Марса и Венеры, но в отличие от Земли отсутствие фотосинтеза привело здесь к почти полному отсутствию кислорода. Малое содержание водяного пара в атмосфере Марса следует приписать влиянию низкой температуры поверхности этой планеты. Одним из возможных объяснений малого содержания воды в атмосфере Венеры является то, что планета сформировалась из протопланетного вещества, которое содержало меньше воды, чем земное. Меркурий и Луна практически не имеют атмосфер (в меньшей степени это относится к Меркурию), что обусловлено, по-видимому, быстрой диссипацией (улетучиванием) продуктов дегазации их твердых оболочек. Важной компонентой атмосфер могут быть в данном случае частицы солнечного ветра. Для планет-гигантов характерен тот факт, что они удержали гораздо большее количество легких газов (включая водород и гелий), чем планеты земной группы.

Естественно, что теория происхождения и эволюции планетарных атмосфер легче всего может быть проверена на примере атмосферы Земли, для которой имеется значительно больше данных, чем в любом другом случае. Однако при этом возникает следующее затруднение. химический состав земной атмосферы определяется ее сложным взаимодействием с биосферой, гидросферой и литосферой. Детальный баланс компонент атмосферы за длительные промежутки времени поддерживается в данном случае сложной совокупностью циклических процессов. Именно это определяет различия в химическом составе атмосфер Земли, Марса и Венеры.

Как отметил американский ученый Л. Д. Медоуз, геологические данные указывают, что за последние 10—20% времени существования Земли состав ее атмосферы был умеренно устойчивым. Еще более устойчив состав современной атмосферы, хотя при этом осуществляется очень интенсивный кругооборот веществ. Например, цикл преобразований воды, вовлекающий весь объем океанической воды, занимает всего около $7 \cdot 10^4$ лет, причем является, по-видимому, весьма устойчивым. Хотя в течение относительно коротких периодов (порядка нескольких миллионов лет) циклические процессы устойчивы, они, несомненно обладают изменчивостью в масштабах более длительных промежутков времени.

Если оценить период времени, необходимый для вы-

деления за счет вулканических извержений в атмосферу количества воды, равного существующему сейчас в гидросфере, то получается величина порядка 10^7—10^8 лет. Это означает, что должен существовать какой-то механизм удаления воды из цикла ее кругооборота. По-видимому, таким механизмом является адсорбция воды морскими донными осадками. Содержание кислорода в атмосфере, вероятно, всегда контролировалось биосферой.

В целом, в настоящее время нет оснований подразделять историю эволюции земной атмосферы более чем на два периода — добиологический и биологический, обладающих примерно одинаковой продолжительностью. Добиологическая атмосфера состояла, главным образом, из углекислого газа и водяного пара. Сопоставление данных о содержании этих двух компонент в атмосферах Земли, Марса и Венеры позволяет утверждать, что если первичная атмосфера Земли образовалась путем дегазации, то то же самое относится к Марсу и Венере.

Эволюция состава атмосфер сопровождалась изменением парникового эффекта[1] и температуры поверхности. Оценки современной равновесной температуры Земли, определяемой из условия теплового баланса, дают величины от 250 до 255°К, тогда как средняя температура земной поверхности составляет 286—288°К. Сопоставление этих цифр характеризует величину парникового эффекта, обусловленного атмосферой. Если разделить уходящее тепловое излучение Земли (излучение в космос) на две компоненты, определяющие излучение поверхности и атмосферы, то можно оценить собственный вклад атмосферы в парниковый эффект при заданных величинах альбедо Земли, излучательной способности земной поверхности, и прихода тепла от Солнца (солнечной постоянной).

Предполагается, что за время геологической эволюции Земли солнечная постоянная (средний внеатмосферный поток лучистой энергии Солнца) увеличилась на 30%. Расчет «назад», сделанный американскими учеными К. Саганом и Г. Мулленом, показывает, что менее чем $2{,}3 \cdot 10^9$ лет назад температура Земли должна бы-

[1] Парниковым эффектом называют способность атмосферы, сравнительно хорошо пропуская солнечную радиацию, сильно ослаблять теплоотдачу земной поверхности в космическое пространство посредством теплового излучения (аналогичный эффект имеет место и в обычном парнике).

ла быть ниже точки замерзания морской воды. Геологические данные указывают, однако, на то, что жидкая вода существовала в больших количествах еще $3{,}2 \cdot 10^9$ лет тому назад. Это противоречие можно разрешить, если предположить, что докембрийская атмосфера содержала аммиак при относительной концентрации не более нескольких миллионных долей. Поскольку аммиак имеет полосы поглощения в окне прозрачности атмосферы при длинах волн 8—13 мкм, то даже при малом его содержании парниковый эффект намного усиливается.

Альтернативой может служить предположение, что окно прозрачности «перекрывалось» молекулярным водородом, который обладает сильным поглощением при длинах волн более 7.5 мкм. Возможно, что первоначально преобладало влияние водорода, и Земля охлаждалась по мере его диссипации, а затем ($3{,}5 \cdot 10^9$ лет назад) парниковый эффект был восстановлен благодаря влиянию аммиака и водяного пара. Уменьшение содержания аммиака по мере образования кислорода за счет фотосинтеза обусловило переход к современному парниковому эффекту, обусловленному влиянием водяного пара и углекислого газа. Упомянутая аргументация позволяет сделать вывод, что кислород не мог присутствовать в больших количествах ранее чем 1—2 млрд. лет тому назад.

Аналогичные расчеты, сделанные для Марса, показали, что в прошлые эпохи на этой планете могли существовать гораздо более мягкие условия. Если предположить дальнейшее увеличение солнечной постоянной, то в будущем (через $4{,}5 \cdot 10^9$ лет) условия на Земле должны эволюционировать к соответствующим на сегодня для Венеры, а Марс достигнет условий, сходных с земными.

Сравнительные характеристики атмосфер планет

Естественно, что наилучшие возможности для сопоставления открывают наиболее полные данные, относящиеся к Венере, Земле и Марсу. Именно поэтому Р. М. Гуди предпринял сравнительное исследование условий погоды на перечисленных планетах. Основным «двигателем» атмосферной циркуляции являются гори-

Сумська

Сравнительные данные о метеорологических параметрах трех планет

Планета	Давление у поверхности, атм	Средняя температура поверхности, °К	Компоненты атмосферы		Количество облаков, %
			главные	малые	
Венера	90	750	CO_2, Ar(?)	HCl, HF, CO, H_2O и т. д.	100
Земля	1	300	N_2, O_2, Ar	CO_2, H_2O, O_2, O_3 и т. д.	50
Марс	$6 \cdot 10^{-2}$	230	CO_2	CO_2, H_2O, CO, O_3 и т. д.	3[1]

[1] С учетом последних данных АМС «Марс» и «Маринер» эту цифру следует
[2] Эта цифра относится к верхней части атмосферы Венеры. В нижних слоях

зонтальные разности температуры. В этом отношении условия на трех планетах земной группы существенно различаются. На Венере разность температур между экватором и полюсом составляет менее 1% по отношению к средней температуре планеты (и возможно, что циркуляция атмосферы определяется тепловым контрастом между ночным и дневным полушариями), тогда как на Земле она возрастает до 15%, а на Марсе достигает 40%. Если предположить, что температура атмосферы определяется только радиационным балансом (разностью между солнечной радиацией, поглощенной планетой, и уходящим тепловым излучением), то экватор должен быть нагретым, а полюса — холодными.

Влияние атмосферы на теплообмен состоит, в частности, в конвективном переносе тепла от экватора к полюсу. Если конвекция доминирует, то следует ожидать малых различий температуры между экватором и полюсом. При не очень интенсивном перемешивании создаются сильные локальные температурные контрасты, сопровождаемые локальным балансом между поглощенной солнечной радиацией и уходящим излучением. В данном случае важен учет как радиационных (первоисточника циркуляции), так и динамических процессов.

Таблица 2

земной группы

Условия на поверхности	Параметр Кориолиса на широте 30°, c^{-1}	Топография, ед. шкалы высот	Продолжительность солнечных суток, с	Время релаксации		Адиабатический вертик. перепад темпер., °К/км
				радиационной	динамической	
Жидкость в химическом равновесии	$6 \cdot 10^{-7}$	0,2	$1{,}02 \cdot 10^{7}$	$1 \cdot 10^{9}$	$3 \cdot 10^{4}$	10,5 [2]
То же	$7 \cdot 10^{-5}$	0,3	$8{,}6 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{3}$	9,8
Пыль	$7 \cdot 10^{-5}$	1,0	$8{,}9 \cdot 10^{4}$	$2 \cdot 10^{5}$	$5 \cdot 10^{3}$	4,5

считать сильно заниженной.
атмосферы эта величина уменьшается до ~8° К/км.

Взаимодействие этих процессов определяет величину температурного контраста между экватором и полюсом. Соотношение обоих факторов можно характеризовать временем термической релаксации (временем установления равновесного теплового режима) для радиационных и динамических процессов. Табл. 2, составленная с использованием данных Р. М. Гуди (США) и Г. С. Голицына (СССР), содержит сравнительные сведения о метеорологических параметрах трех планет земной группы, позволяющие сопоставить особенности атмосферной циркуляции, теплового режима и условий образования облачности на этих планетах. В табл. 3 и 4 даны сведения о составе атмосфер планет, взятые по данным Р. М. Гуди и Д. Уолкера.

На вращающейся планете циркуляция в большей или меньшей степени контролируется отклоняющей силой вращения — силой Кориолиса (это не относится, однако, к низким широтам, где сила Кориолиса мала). Важное значение имеет соотношение между радиационным и динамическим временами релаксации. Второе — того же порядка, что и величина, обратная силе Кориолиса. В случае медленно вращающейся Венеры оно близко к времени, затрачиваемому звуковой волной на путь

Таблица 3

Состав атмосфер трех планет земной группы (относительная концентрация в процентах) [1]

Газ \ Планета	Венера	Земля	Марс
CO_2	95	0,03	>50 [2]
N_2, Ar	<5	79	<50 [2]
O_2	$4 \cdot 10^{-3}$	21	10^{-7}
H_2O	10^{-2}	до 1	до 10^{-1}
HCl	10^{-4}	—	—
HF	$2 \cdot 10^{-6}$	—	—
CO	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-5}	10^{-1}
Средний молекулярный вес	44	29	44
Шкала высот, км	14,9	8,4	10,6

[1] Прочерки означают отсутствие соответствующих газов в измеримых количествах.

[2] Эти данные требуют уточнения; обычно марсианская атмосфера считается практически чисто углекислой. Однако последние данные («Марс-6») привели к выводу о содержании аргона, равном 35 ± 10%.

Таблица 4

Состав атмосфер планет-гигантов (число молекул выше облаков в вертикальном столбе сечением 1 см²) [1]

Планета \ Газ	H_2	He	CH_4	NH_3
Юпитер	$1,8 \cdot 10^{26}$ [2]	$9,1 \cdot 10^{25}$ [2]	$1,2 \cdot 10^{23}$	$2,6 \cdot 10^{22}$
Сатурн	$3,7 \cdot 10^{26}$	—	$9,4 \cdot 10^{23}$	$6,7 \cdot 10^{21}$
Уран	$1,3 \cdot 10^{27}$	—	$9,4 \cdot 10^{24}$	
Нептун	—	—	$1,6 \cdot 10^{25}$	

[1] Прочерки указывают на отсутствие данных измерений.

[2] Данные АМС «Пионер-10» и «Пионер-11» указывают на то, что отношение концентраций $He/H_2 \approx 0,2$. Это требует уточнения приведенных здесь величин.

вокруг планеты. Таким образом, динамическая релаксация определяется крупномасштабными параметрами планеты и слабо зависит от природы и массы атмосферы.

Время радиационной релаксации — это время, которое необходимо для того, чтобы в результате поглощения атмосферой солнечной радиации температура поднялась от нуля до наблюдаемой величины. Ясно, что это время пропорционально массе атмосферы и, следовательно, атмосферному давлению у поверхности, которое изменяется в широких пределах от 100 атм на Венере и до $6 \cdot 10^{-2}$ атм на Марсе. Поскольку на всех трех рассматриваемых планетах время динамической релаксации значительно меньше времени радиационной релаксации (см. табл. 2), очевидно, что динамические эффекты (ветер) во всех случаях играют большую роль, будучи наиболее сильно выраженными на Венере с ее массивной атмосферой (отношение времен радиационной и динамической релаксаций равно $3 \cdot 10^4$). Наименьший вклад динамических факторов имеет место на Марсе (отношение времени релаксации составляет всего 40), а Земля занимает промежуточное положение ($3 \cdot 10^3$).

Именно эти обстоятельства определяют тот факт, что на Венере наблюдается минимальная разность температур экватор—полюс, составляющая менее 1% от средней температуры атмосферы. Интенсивный перенос воздуха сглаживает различие температуры на экваторе и полюсе, обусловленное разным потоком падающей солнечной радиации. На Марсе, где важным фактором является и тепло, выделяющееся при сублимации углекислого газа в зонах полярных шапок, упомянутая разность температур достигает 40% от средней температуры благодаря малой массе атмосферы. Влияние атмосферных движений на сглаживание разности температур экватор—полюс минимально, а роль радиационных факторов максимальна по сравнению с двумя другими планетами.

Соотношение между временем радиационной релаксации и продолжительностью суток характеризует изменчивость температуры воздуха в течение дня (суточный ход температуры). Очевидно, что если время релаксации гораздо больше продолжительности суток, то это означает малую изменчивость температуры, и наоборот. В соответствии с этим наибольшая амплитуда суточного хода температуры должна иметь место на Марсе. Это и

наблюдается в действительности и обусловливает, в частности, большую роль солнечных атмосферных приливов на Марсе, которые являются одним из главных факторов, определяющих изменения марсианской погоды.

Специфическую черту Марса, сказывающуюся на атмосферной циркуляции, представляет наиболее резко выраженный рельеф (см. табл. 2). Однако несмотря на эту специфику, общая циркуляция в зимнем полушарии Марса очень сходна с земной, для которой характерно (в умеренных широтах) развитие циклонов и антициклонов при наличии преобладающего зонального (вдоль кругов широты) переноса. Анализ телевизионных изображений облачного покрова Марса обнаружил, например, наличие структур облачности, напоминающих систему облаков холодного фронта на Земле.

Различными являются, по-видимому, условия общей циркуляции в летних полушариях. Практически одинаковый наклон осей вращения обусловливает на обеих планетах больший суммарный летний поток солнечной радиации к полюсам, чем к экватору. Однако вследствие большого количества облаков в полярных районах Земли (и соответственно более высокого альбедо планеты) реальный поток радиации на земную поверхность оказывается сильно уменьшенным, тогда как на Марсе влияние облачности проявляется слабо и эффект возрастания солнечной радиации к полюсам на уровне поверхности отчетливо выражен. Поэтому в летнем марсианском полушарии следует предполагать наличие преобладающего восточно-западного зонального переноса воздуха, слабых ветров и отсутствия планетарных атмосферных волн. Доминирующей является, по-видимому, упомянутая выше система приливных ветров, сочетающаяся с зональным переносом и усложненная влиянием топографии.

Некоторые основные физические процессы в атмосферах планет

Несмотря на специфику условий на различных планетах, общность законов, определяющих тепловой режим и динамику атмосфер планет, а также известные

черты сходства физических условий позволяет в ряде случаев осуществить общий подход к решению задач метеорологии планет.

Учитывая сходство процессов формирования распределения температуры атмосфер ряда планет, американский ученый Р. Д. Сэсс предложил приближенную радиационно-конвективную теоретическую модель вертикального профиля температуры в атмосфере, состоящей из углекислого газа. При этом предполагается существование лучистого равновесия в стратосфере и наличие конвективной тропосферы[1]. Развитая Р. Д. Сэссом теория позволила получить формулы для расчета вертикального профиля температуры в предельных случаях — протяженной и тонкой тропосферы, и в общем случае, которые могут быть использованы для расчетов, относящихся к условиям Венеры и Марса.

По данным «Маринера-5», температура тропопаузы (переходного слоя, разделяющего тропосферу и стратосферу) на Венере составляет 285°К и практически не зависит от широты, а высота тропопаузы равна 58 км. Результаты расчетов Р. Д. Сэсса удовлетворительно согласуются с этими данными. Однако для средней части вертикального профиля температуры в стратосфере вычисления дают заниженную температуру, что связано с пренебрежением в расчетах поглощения солнечной радиации слоем облаков, расположенным вблизи уровня 70 км (учитывается лишь главный облачный слой, верхняя граница которого расположена примерно на высоте 50 км).

Расчетные вертикальные профили температуры для марсианской атмосферы хорошо согласуются с данными, полученными АМС «Маринер-6» и «Маринер-7» и относящимися к высотам менее 30 км. В более высоких слоях атмосферы расчетные температуры значительно превышают измеренные, что исключает вытекающую из данных наблюдений возможность конденсации углекислого газа. Несмотря на удовлетворительное согласие ре-

[1] Тропосферой называют нижнюю часть атмосферы, для которой характерны наличие сильного вертикального перемешивания и падение температуры с высотой (толщина земной тропосферы возрастает от 8—10 км в полярных широтах до 16—18 км в тропиках). В расположенной над тропосферой стратосфере наблюдается рост температуры с высотой (верхняя граница земной стратосферы располагается на высоте 50—55 км).

зультатов расчетов с данными наблюдений, следует с осторожностью относиться к рассмотренной модели как физической реальности, поскольку имеются, например, данные, согласно которым тропопауза Венеры расположена значительно выше 58 км. В атмосфере Марса могут иметь место различные процессы, которые не учитываются в использованной радиационно-конвективной модели.

Другим интересным примером сравнительного исследования физических процессов в атмосферах планет является работа П. Д. Гираша и др. (США), в которой рассмотрена задача о возникновении крупномасштабной динамической неустойчивости в планетарной атмосфере при такого рода воздействии на облачность динамических факторов, когда лучистый приток тепла зависит от свойств облаков, а они, в свою очередь, определяются вертикальными движениями, обусловленными лучистым притоком тепла. Предполагается, что подобный механизм может быть источником энергии атмосферных движений, в особенности в таких своеобразных случаях, как зональные ветры на Юпитере и движения верхней границы облаков на Венере.

П. Д. Гираш и другие показали, что покоящаяся облачная атмосфера может быть неустойчивой по отношению к крупномасштабным возмущениям, осредненным в горизонтальной плоскости и выражающимся в вертикальном смещении горизонтально однородного слоя облачности (исключается из рассмотрения случай кучевых облаков, турбулентности или просветов в облаках: влияние этих эффектов может быть учтено приближенно). При такого рода смещениях слоя облачности может происходить изменение лучистого притока тепла вблизи верхней границы облаков (оптически толстые облака) или в толще облаков (если они оптически тонкие) [1], которое и вызывает появление неустойчивости. В рассматриваемой упрощенной модели возникновения неустойчивости предполагается, что лучистый приток, возникающий при смещении облака, пропорционален величине смещения на каждом уровне (соответствующий коэффициент пропорциональности может быть как положительным, так и отрицательным).

[1] Оптически толстыми называют облака, обусловливающие сильное ослабление проходящей через них радиации; в оптически тонких облаках радиация почти не ослабляется.

Оценки, относящиеся к Юпитеру, позволяют объяснить существование на этой планете осесимметричных полос облачности. Согласно этим оценкам длина волны возмущений порядка 19 000 км на широте 23°, что хорошо согласуется с данными наблюдений. На очень медленно вращающейся Венере неустойчивость проявляется в форме атмосферных гравитационных волн. Оценки характерной временной изменчивости также согласуются с данными наблюдений.

Большой интерес представляет проблема образования облаков на различных планетах. Она подробно рассматривалась применительно к атмосферам Юпитера и Венеры американскими учеными Д. Стауффером и К. С. Кингом. Последние исследования формирования облаков различных планет направлены на решение задачи о том, состоят ли они из капель двойных смесей: например, капель растворов NH_3—H_2O на Юпитере, HCl—H_2O — на Венере. Согласно предложенным ранее теориям, жидкие растворы в форме капель образуются в рассматриваемых случаях, как только парциальное давление каждой из компонент достигает величины насыщающей упругости пара над жидкостью (упругости, при которой начинается конденсация пара). Подобная ситуация может, однако, иметь место лишь при наличии ядер конденсации, как это хорошо известно из опыта изучения образования земных водных облаков. Если же происходит «однородная гетеромолекулярная» конденсация (при отсутствии ядер конденсации), то появление капель конденсата возможно лишь в том случае, когда парциальное давление каждой из компонент существенно превосходит насыщающее.

Д. Стауффер и К. С. Кинг предложили теорию и сделали расчеты однородной гетеромолекулярной конденсации, характеризующие зависимость пороговых величин парциального давления NH_3 (или HCl, H_2SO_4 и C_2H_5OH) от относительной влажности, при которых происходит образование капель соответствующего раствора при отсутствии ядер конденсации. Результаты расчетов показали, что в условиях атмосферы Юпитера нижняя граница облаков из раствора NH_3—H_2O должна находиться существенно выше, чем это вытекает из расчетов, предполагающих наличие ядер конденсации. Аналогичное смещение нижней границы облаков вверх примерно на 20 км имеет место у внешних планет-гигантов

Урана и Нептуна. Расчеты для предложенной американскими учеными С. Д. Вейденшиллингом и Д. С. Льюисом новой модели атмосферы Юпитера привели к выводу, что в этом случае нижняя граница облаков должна смещаться еще выше — в область температур ниже 273°К, для которой рассматриваемую теорию нельзя считать достаточно надежной.

Если предположить что облака Венеры состоят из капель раствора соляной кислоты, то расчеты Д. Стауффера и К. С. Кианга приводят к выводу о невозможности образования облаков при температуре около 273°К даже при высоком содержании водяного пара, соответствующем данным АМС «Венера». При отношении смеси, равном 0,01% (спектроскопические данные), образование облаков $HCl—H_2O$ на указанном уровне невозможно даже в присутствии пыли (ядер конденсации). Эти выводы делают более вероятной гипотезу о том, что облака Венеры состоят из капель раствора серной кислоты. Если венерианские облака образуются из раствора серной кислоты в слое, где продукция H_2SO_4 максимальна, то расчеты по теории однородной гетеромолекулярной конденсации не обнаруживают изменения высоты нижней границы облаков по сравнению с тем случаем, когда предполагается наличие ядер конденсации, но указывают на бóльшую длительность процесса образования облаков.

Важное значение имеет вертикальная структура облачности. Если например, облака Венеры охватывают всю толщу атмосферы, начиная от поверхности планеты, то в этом случае капли облачного слоя, расположенного внизу, могут служить ядрами конденсации для расположенного над ним слоя атмосферы. Это означает, что конденсация может иметь место при практически нулевом пересыщении, как это происходит при наличии запыленной атмосферы. Такая ситуация является, однако, маловероятной: впервые осуществленные на АМС «Венера-8» измерения освещенности указывают на то, что нижний 35-километровый слой венерианской атмосферы свободен от облаков.

Как на Юпитере, так и на Венере (при высоком содержании водяного пара) облака из растворов $NH_3—H_2O$ и $HCl—H_2O$ образуются при относительной влажности, близкой к той, которая соответствует началу конденсации чистой воды. Поэтому для решения проблемы

состава облаков гораздо важнее точные измерения содержания водяного пара, а не NH_3 или HCl. Результаты вычислений для смеси $C_2H_5OH—H_2O$ и данные лабораторных измерений оказались в хорошем согласии, что свидетельствует о надежности упомянутой расчетной методики. Для более уверенного прогноза условий образования облаков в атмосферах планет необходимы более надежные данные о содержании водяного пара, а также дальнейшие лабораторные эксперименты с целью проверки точности методики расчетов.

Исследования Марса при помощи АМС «Марс-2» «Марс-3» и «Маринер-9», выполненные в период глобальной пылевой бури конца 1971 — начала 1972 г. возбудили острый интерес к разработке теории пылевых бурь. Как уже отмечалось, возникновение пылевых бурь и радиационно-обусловленная общая циркуляция марсианской атмосферы делают возможным рассмотрение погоды на этой планете как модели, характеризующей воздействие аэрозольных загрязнений атмосферы на метеорологический режим. Исследование такого рода модели может представить большой интерес с точки зрения анализа возможных воздействий хозяйственной деятельности человека на климат Земли. Обнаруженный, по данным АМС, антипарниковый эффект марсианской пыли, состоящий в том, что в период пылевой бури происходило охлаждение поверхности и увеличение температуры атмосферы (под влиянием поглощения солнечной радиации пылью), схож с аналогичным явлением, иногда наблюдаемым в условиях земной атмосферы. Как уже упоминалось, большой интерес представляет вопрос о вариациях атмосферного озона на Марсе, открывающий возможности параллелей с проблемой воздействия сверхзвуковой авиации на слой озона в атмосфере Земли.

Обратимся теперь к рассмотрению конкретных результатов, относящихся к Венере, Марсу и Юпитеру. Поскольку выше уже были сообщены краткие сведения о структурных параметрах и составе атмосфер (табл. 2—4), мы сконцентрируем далее внимание на проблемах динамики атмосфер. Подробные сведения о структурных параметрах и составе атмосфер можно найти в рекомендованной литературе, приведенной в конце брошюры.

Венера

Рассмотренные выше данные о структурных параметрах венерианской атмосферы указывают на то, что ее нижняя часть находится в состоянии конвективного равновесия. Именно это обстоятельство является наиболее важным при построении современных теоретических моделей теплового режима и общей циркуляции атмосферы. Однако прежде чем перейти непосредственно к этим моделям, рассмотрим сначала имеющиеся наблюдательные данные о ветрах на Венере. Такого рода данные получены прежде всего на основе многолетних наземных наблюдений динамики неоднородностей облачного покрова в ультрафиолетовой области спектра. Подобные наблюдения были недавно продолжены путем получения ультрафиолетовых изображений Венеры с борта АМС «Маринер-10». Наконец, важные сведения о ветрах на различных высотах принесли наблюдения спуска и дрейфа АМС «Венера», которые впервые позволили получить сведения о ветрах на Венере путем прямых измерений.

Четырехсуточная циркуляция. Облачный покров Венеры препятствует определению угловой скорости вращения поверхности планеты по данным наблюдений при помощи телескопов. Наблюдения нечетких сероватых неоднородностей, относительно которых предполагалось, что они являются видимыми через случайные проясения атмосферы участками твердой поверхности, привели в прошлом ко многим ошибочным определениям периода вращения, дававшим величины от 1 до 225 суток. Только радиоастрономические измерения последних лет надежно установили наличие обратного вращения Венеры с периодом, равным 243 суткам (солнечные сутки на планете равны 117 дням).

Неоднородности облачного покрова, наблюдаемые на фотографиях, полученных в ультрафиолетовой области спектра и имеющие, как правило, Y- и Ψ-образную форму, позволяют, однако, прослеживать по перемещению этих неоднородностей характер атмосферных движений.

Анализ Ч. Бойером фотографий Венеры, полученных в ультрафиолетовых лучах при помощи 260-миллиметрового рефрактора в Браззавиле (4° ю. ш.), выявил еще в самом начале этих наблюдений четырехсуточное вра-

щение неоднородностей вблизи экватора. Тогда же было высказано предположение, что в данном случае наблюдалось вращение атмосферы. Дальнейшие наблюдения подтвердили этот вывод и обнаружили, что вращение является обратным. К такому же выводу привел анализ фотографий, полученных при помощи 660-миллиметрового и 1-метрового телескопов в обсерватории Пик-дю-Миди; период вращения составил 3,995 суток (это соответствует скорости 112 м/с), причем речь идет о вращении верхних слоев атмосферы на высоте около 80 км. Детальный анализ скорости вращения различных неоднородностей за время порядка нескольких часов обнаружил специфические особенности вращения Y- и Ψ-образных неоднородностей. В частности, скорость вращения зависит от местоположения неоднородностей, изменяясь от 50 до 140 см/с.

Выполненный Д. Никандером и Ч. Бойером анализ 300 наилучших фотографий Венеры в ультрафиолетовом свете, полученных в Медонской обсерватории в 1966—1969 гг., обнаружил обратное вращение этих неоднородностей с периодом 4,0±0,5 суток. Это приводит к оценке верхнего предела скорости ветра порядка 740 км/ч, если предположить, что облака находятся на высоте 95 км по отношению к «радиолокационной» поверхности (планетоцентрический радиус равен 6052 км). Соответствующая минимальная скорость составляет 320 км/ч. Реальность этого вращения массы верхней атмосферы была независимо подтверждена данными доплеровских измерений, а также измерений при помощи эталона Фабри-Перо в интервале длин волн 5500—5700 Å. Согласие упомянутых данных, приводящих к периоду вращения 4,3±0,4 суток, с результатами анализа фотографий превосходно. Таким образом, можно считать надежно установленным существование быстрого вращения верхней атмосферы Венеры, что, по-видимому, отражает наличие сложной планетной циркуляции атмосферы.

В связи с обнаружением четырехсуточной циркуляции было предпринято несколько попыток ее объяснения, которые сводились прежде всего к предположениям о наличии перемещающейся волны солнечного нагревания, обеспечивающей вертикальный перенос количества движения, или о неустойчивости, связанной с вер-

тикальным сдвигом термически обусловленной системы циркуляции от подсолнечной к противосолнечной точке. Американский ученый К. Б. Леови отметил, что при этом было упущено, однако, одно важное обстоятельство, касающееся атмосферной циркуляции на Венере. Если у поверхности Венеры имеет место пренебрежимо малый меридиональный перепад атмосферного давления (как об этом свидетельствуют данные АМС «Венера»), но существует небольшое уменьшение средней температуры от экватора к обоим полюсам, то изобарические (равного давления) поверхности на больших высотах должны обнаруживать экваториальный «горб». Обусловленная им сила давления может быть уравновешена лишь избыточной центробежной силой, которая порождается вращением, усиливающимся с высотой.

Сделанные К. Б. Леови оценки показывают, что для обеспечения такого рода баланса сил достаточно разности средних температур экватор—полюс, равной 3°К (а это является вполне приемлемым). Однако остаются открытыми вопросы о том, как возникает вертикальное распределение скорости вращения и как может поддерживаться вращение, несмотря на противоборствующее влияние турбулентной и молекулярной вязкости при наличии вертикального сдвига ветра.

К. Б. Леови полагает, что в любой планетарной атмосфере при наличии экваториального термического «горба» (обусловленного нагреванием), но при отсутствии неустойчивости (вследствие медленного вращения планеты или затухания) должно возникать избыточное вращение, совпадающее по знаку с вращением верхних слоев атмосферы планеты.

Данные АМС «Маринер-10». Обнаружение четырехсуточной циркуляции верхних слоев атмосферы Венеры вызвало большой интерес к изучению атмосферной циркуляции по данным наблюдений с АМС. В связи с этим при разработке телевизионной аппаратуры АМС «Маринер-10», предназначенной в первую очередь для получения изображений поверхности Меркурия, была предусмотрена также возможность получения ультрафиолетовых снимков Венеры. Телевизионная аппаратура (две последовательно функционирующие камеры), подобная использованной ранее на «Маринере-9» была усовершенствована, прежде всего, за счет расширения полосы пропускания линии связи с 16 до 117,6 кбит/с, что позволи-

ло избегнуть употребления бортовой памяти и передавать изображения в реальном масштабе времени. Замена оптики на новую (с 1500-миллиметровым фокусным расстоянием) и применение набора светофильтров позволили получать изображения на длинах волн 3550, 4740, 4820, 5120, 5780, 3580 Å (последний светофильтр — поляризационный). Поле зрения составляет 0,36°×0,48°. Каждое телевизионное изображение, регистрируемое за 42 с, состоит из 700 линий сканирования с 832 «точками» вдоль линии. Возможно различение 256 уровней яркости (при предельно высоком пространственном разрешении отношение сигнала к шуму равно 20:1). Использование методики усиления контрастов позволяет различать очень малые контрасты яркости (вплоть до вариаций яркости менее 1%).

Всего за восемь суток зарегистрировано около 3400 доброкачественных изображений с разрешением не хуже 130 км (это примерно вдвое лучше, чем самое высокое разрешение, достигаемое наземными наблюдениями). Изображения, полученные через голубой и оранжевый светофильтры, обнаруживают лишь очень слабые контрасты яркости и пока еще не были тщательно проанализированы. Рассмотрены поэтому лишь ультрафиолетовые изображения и часть снимков при оранжевом фильтре, относящихся к краю диска планеты.

Б. К. Муррей и другие (США) проанализировали серию ультрафиолетовых изображений (рис. 1, 2, 3, 4), указывающих на существование следующих неоднородностей облачного покрова: 1) мелкомасштабные (100—150 км) «крапинки» в подсолнечной точке экваториальной зоны (рис. 1,а, рис. 2); 2) струеобразные (с минимальной различимой шириной 10—20 км) и полосчатые структуры в высоких широтах обоих полушарий (рис. 1,б, рис. 3, 4); 3) сильно расходящиеся потоки вокруг подсолнечной точки, симметричные относительно экватора (рис. 3, 4). Крупные светлые и темные образования с размерами порядка 1000 км, контраст между которыми составляет около 30%, имеет богатую тонкую структуру с характерными размерами до 10 км. Продолжительность существования отдельных образований в диапазоне широт ±50° варьируется от 2 до 12 ч.

Изменчивость яркости облачного покрова Венеры в

Рис. 1. Мелкомасштабная структура («крапинки») облачного покрова вблизи экватора (а); крупномасштабные полосы («струи») облачности в высоких широтах (б). Черные точки (здесь и на последующих фотографиях) представляют собой отметки на экране телевизионной трубки, используемые для устранения геометрических искажений при первичной обработке фотографий.

Рис. 2, а, б. Телевизионные изображения облачного покрова вблизи подсолнечной точки, полученные с интервалом по времени, равным 2 ч. Обращают на себя внимание устойчивость крупной ячейки (около 280 км), указанной стрелкой, и изменчивость более мелких ячеек (170 км) в правой (восточной) части изображений.

Рис 3. Основные особенности глобального облачного покрова, отражающие закономерности общей циркуляции атмосферы. 1 — дугообразные волны; 2 — подсолнечная область; 3 — полярная область; 4 — полярное кольцо; 5 — спиралеобразные струи; 6 — околоэкваториальные пояса.

Рис. 4, а, б, в. Серия глобальных мозаик телевизионных изображений, построенных через 7-часовые интервалы и отражающих устойчивость крупных темных и светлых образований в течение 14 ч. Размеры этих образований, указанных стрелками, составляют около 1000 км.

ультрафиолетовой области спектра, несомненно, отражает особенности общей циркуляции атмосферы в верхней тропосфере и стратосфере. При этом наблюдаемая сильная зависимость яркости от длины волны обусловлена, по-видимому, вариациями поглощательной способности облаков, а не их микроструктуры. Кроме того, временная динамика отдельных образований указывает, вероятно, на образование или диссипацию конденсата облаков, а не пыли или продуктов фотохимических реакций. Поскольку, однако, состав облаков остается неизвестным, выводы о пространственном распределении ветра, полученные по динамике неоднородностей облачного покрова, требуют дальнейшего подтверждения.

Полученные за период восьми суток в феврале 1974 г. изображения планеты обнаруживают в верхней тропосфере и стратосфере Венеры циркуляцию, обладающую в обоих полушариях высокой степенью симметрии относительно оси вращения планеты при угловой скорости, возрастающей с широтой до 2 суток на широте 50° в обоих полушариях (рис. 3, 4). Наблюдения зонального переноса вблизи экватора подтверждают наличие 4-суточной обратной циркуляции и указывают на существование нескольких слабо заметных зональных полос шириной менее 100 км. Анализ изображений Венеры, полученных через 4 суток после сближения до кратчайшего расстояния, обнаружил наличие на экваторе отчетливой Y-образной структуры, подобной многократно наблюдавшейся ранее с Земли и также указывающей на существование четырехсуточного вращения.

Для подсолнечной зоны экваториального пояса характерно присутствие ячеистой структуры облачности, подобно представленной на рис. 2. Анализ мозаик изображений высокого разрешения показывает, что самые крупные и менее отчетливо выраженные ячейки (500 км) имеют темные края и некоторые из них обладают формой многоугольников. По-видимому, продолжительность их существования не превосходит нескольких часов. Внутренняя часть крупных ячеек имеет тонкую структуру. Обнаружены также несколько меньшие ячейки ($\sim$200 км), которые перемещаются вместе с ветром и заметно изменяются за два часа. Зона экваториальной конвекции, которая непрерывно развивается в области подсолнечной точки (следуя за перемещением Солнца), имеет протяженность около $\pm 20°$ по широте и не ме-

нее 80° по долготе. Наблюдается взаимодействие между этой зоной конвекции и средним зональным потоком.

Потоки в форме ярких полос, напоминающих земные струйные течения, опоясывают Венеру в меридиональном направлении спиралями (простирающимися по долготе на 200—300°), которые сливаются в обоих полушариях на широте около 50° с отчетливо выделяющейся полярной полосой («кольцом») облачности (рис. 3, 4). Анализ мозаик изображений высокого разрешения показывает, что со стороны экватора к упомянутым спиралям примыкают более мелкие «струи», а иногда кольцеобразные «завитки», свидетельствующие о наличии горизонтального сдвига ветра и турбулентности. В каждом полушарии наблюдаются по крайней мере две системы спиралеобразных потоков, особенно отчетливо выраженных на широтах ±30° (одна из систем потоков располагается симметрично относительно экватора). Рассматриваемые потоки не обнаруживают ни каких-либо признаков неустойчивости в глобальных масштабах, ни структуры, подобной земным циклоническим вихрям.

Анализ последовательных изображений за четырехсуточный период, характеризующих динамику облачности в полосе широт от +40° до —50°, указывает на сложный характер распределения неоднородностей облачного покрова. Оценка скорости зонального переноса в экваториальном поясе (вне подсолнечной зоны) привела к значению порядка 100 м/с и выявила обратную циркуляцию, что полностью согласуется с выводами наземных наблюдений. Замечено, однако, что мелкомасштабные неоднородности не всегда участвуют в этом переносе. В высоких широтах перенос также является преимущественно зональным.

В низких широтах не обнаружено какого-либо заметного меридионального движения, но в более высоких широтах (30—50°) наблюдается направленная к полюсу компонента порядка 10 м/с. На некоторых из мозаик замечены очень слабые пояса облачности, параллельные экватору. Иногда в области широт ±20° отмечаются 3—4 таких пояса, ширина которых менее 100 км. Эти пояса, по-видимому, быстро перемещаются вокруг планеты в направлении общего движения и иногда пересекают круги широт. Несомненно существование динамического взаимодействия сильного зонального потока и

зоны конвекции в подсолнечной области. На некоторых мозаиках обнаружены темные образования, которые можно истолковать как свидетельство существования дугообразных «волн», возникающих под влиянием взаимодействия с «мягким» препятствием (рис. 3). Эти «волны» движутся относительно препятствия, в отличие от истинных волн такого типа. Они симметричны относительно экватора, распространяясь по крайней мере до широты ±30°, и, по-видимому, существуют в виде пар.

Наиболее яркими крупномасштабными особенностями структуры облачного покрова являются околополярные пояса облачности. Так, например, южное полярное кольцо охватывает полосу широт, имеющую ширину 10—15° по широте с южной границей вблизи 50° ю. ш. (рис. 3, 4). По-видимому, аналогичное кольцо существует и в северном полушарии (условия наблюдений не позволили изучить облачность в северном полушарии). Возможно, вся полярная область представляет собой вихрь, «питаемый» меридиональным потоком из экваториального пояса (мелкомасштабные вихреобразные струи наблюдаются на краю полярной шапки).

Анализ изображений края диска Венеры (рис. 5) обнаружил существование многослойной структуры, расположенной над слоем облачности, — дымки (вблизи уровня 10 мбар и выше), имеющей слои толщиной до 1 км. Наличие многослойной дымки указывает на большую устойчивость атмосферы на соответствующих уровнях. Вероятно, коэффициент вертикального турбулентного перемешивания здесь таков же или меньше, чем наблюдаемый в земной стратосфере, где имеет место аналогичная слоистая структура дымки. Полученные результаты согласуются с современной моделью, предполагающей наличие над плотным облачным покровом (верхняя граница на уровне 200 мбар) слоя дымки с оптической толщиной ~ 2 в диапазоне уровней 20—50 мбар.

При изучении возможных физических факторов общей циркуляции атмосферы обращает на себя внимание неожиданно большое влияние подсолнечной зоны на глобальную циркуляцию. Для решения этой проблемы очень важны прямые измерения температуры, ветра и других параметров в экваториальном и полярных районах, а также измерения микроструктуры и состава облачных частиц. Несомненно, что теоретические сообра-

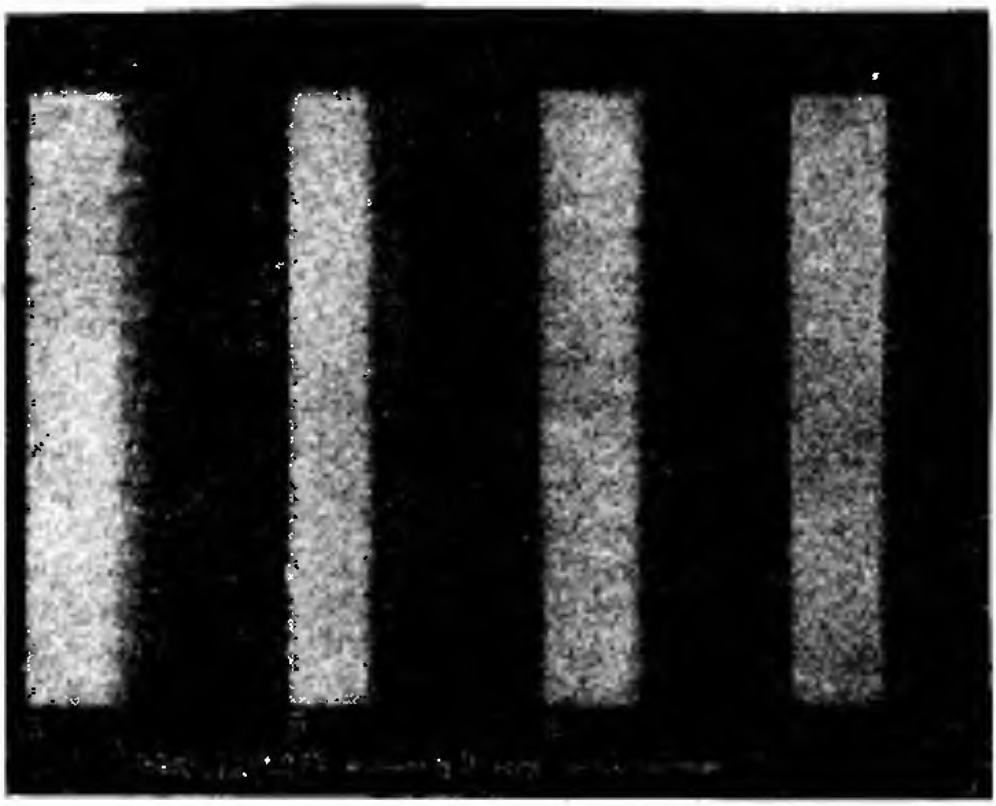

Рис. 5. Изображение края диска Венеры. а, б — изображения края диска вблизи экватора, полученные через оранжевый светофильтр (5780 Å); в, г, — изображения края диска вблизи 22° с. ш., полученные соответственно через оранжевый и ультрафиолетовый (3550 Å) светофильтры.
Нижние границы рассматриваемых слоев атмосферы относятся примерно к уровням не ниже 90 и 10 мбар для оранжевого и ультрафиолетового светофильтров соответственно.

жения относительно природы четырехсуточной циркуляции, изложенных в предыдущем параграфе, требуют существенного пересмотра в свете данных «Маринера-10», обнаруживших гораздо более сложную картину атмосферной циркуляции, чем это предполагалось ранее.

Данные АМС «Венера». Все рассмотренные выше результаты наблюдений атмосферной циркуляции относятся к толще атмосферы над основным облачным покровом. Лишь данные измерений, осуществленных при помощи АМС «Венера», впервые позволили составить представление о динамике подоблачного слоя Венеры на основе эксперимента. Проанализированные советскими учеными В. В. Кержановичем, М. Я. Маровым и другими данные измерений термодинамических параметров атмосферы с АМС «Венера-4» — «Венера-8» дали воз-

можность оценить верхний предел величин вертикальной скорости, выполнить исследования поля скорости и турбулентности в атмосфере Венеры, при использовании данных по динамике спуска межпланетной станции.

Методика определения скорости ветра основана на учете того факта, что радиальная компонента скорости ветра V_k может быть найдена как разность величин радиальной скорости спуска космического аппарата, измеряемой непосредственно при помощи доплеровского метода и рассчитанной с учетом спуска парашюта в условиях штилевой атмосферы, а также взаимного движения и вращения Земли и Венеры. Оценка скорости спуска парашюта сделана с использованием двух независимых методов, один из которых основан на рассмотрении динамики спуска парашюта, а другой связан с использованием данных измерений вертикальных профилей давления и температуры. Основными факторами, от которых зависит надежность решения задачи, является точность определения местоположения точки входа межпланетной станции в атмосферу, динамика системы парашют—станция и стабильность частоты бортовых кристаллических осцилляторов.

После определения радиальной скорости легко рассчитать величины вертикальной и горизонтальной компонент скорости, равные соответственно $V_k \cos\delta$ и $V_k \sin\delta$, где δ — угол между направлениями Земля—Венера и местной вертикалью в зоне спуска АМС. В случае АМС «Венера-4»—«Венера-7» $\delta \leqslant 15°$, для «Венеры-8» $\delta \approx 38°$, что делает данные последней планетной станции наиболее удобными для определения горизонтальной компоненты скорости (точнее, той части горизонтальной скорости, которая соответствует направлению от под-земно́й точки[1] к точке посадки спускаемого аппарата).

Анализ имеющихся результатов измерений позволил определить вертикальную и горизонтальную компоненты скорости ветра по данным АМС «Венера-4»—«Венера-7» и только вертикальную компоненту по данным «Венеры-5»—«Венеры-6». Все данные относятся к ночной стороне планеты (4—5 ч по местному венерианскому времени).

---

[1] Под-земна́я точка определяется пересечением поверхности Венеры линией, соединяющей центры Земли и Венеры.

По данным «Венеры-4», скорость ветра в зоне спуска достигает 40—50 м/с. Однако ниже 40 км ветер не был зарегистрирован. Доплеровские измерения с АМС «Венера-5», «Венера-6» обнаруживают очень медленное изменение скорости ветра в течение всего спуска без заметной турбулентности (скорость ветра не превышает 8—15 м/с). Обработка данных «Венеры-7» привела к скоростям 5—14 м/с на высотах 38—53 км. Ниже 38 км скорость ветра близка к нулю. В слое от уровня поверхности до уровня 3,5 км скорость ветра в среднем монотонно возрастает от нуля до 2,5 м/с (максимальная величина составляет 5 м/с). Вертикальная скорость на высоте 3,5 км в среднем равна 0,5 м/с при максимальной величине 1 м/с.

На рис. 6 изображен полученный М. Я. Маровым и другими вертикальный профиль горизонтальной компоненты скорости ветра по данным АМС «Венера-8». В этом случае азимут под-земнóй точки составляет около 115°, а положительная величина скорости указывает на присутствие ветра в направлении от ночной к дневной стороне, т. е. совпадающего с направлением вращения планеты. Естественно, что при наличии лишь данных измерений проекции вектора горизонтальной скорости на направление от под-земнóй точки к точке посадки невозможно определить зональную и меридиональную компоненты скорости. Если вектор горизонтальной скорости направлен вдоль круга широты, то для перехода от величин, приведенных на рис. 6, к истинной зональной скорости необходимо вводить коэффициент, равный 1,1. Данные измерений согласуются с предположением о меридиональности скорости, если ввести коэффициент, равный ~ 2,4.

Из рис. 6 видно, что скорость ветра возрастает от 0—0,5 м/с у поверхности планеты до 100—140 м/с на высотах более 48 км, но без изменения направления ветра. В слое 20—40 км ветер практически постоянен, составляя 30—36 м/с. Для нижней части тропосферы (0—10 км) характерен слабый ветер. На высотах 12—18 км и вблизи 48 км расположены зоны сильных вертикальных изменений скорости ветра. Обращает на себя внимание тот факт, что по данным «Венеры-8» в слое 20—40 км наблюдаются гораздо более сильные ветры, чем полученные ранее по данным АМС «Венера». Согласно данным «Венеры-7» скорость ветра в упомянутом

слое не превышает 5 м/с, а наблюдения «Венеры-4», относящиеся к почти меридиональному направлению, дали горизонтальную компоненту, близкую к нулю, правда, с точностью около 12 м/с. По результатам АМС «Венера-5», «Венера-6» данных о горизонтальной составляющей ветра получить не удалось, так как эти АМС совершили посадку очень близко от под-земных точек. Принимая во внимание малую скорость ветра у поверхности Венеры, М. Я. Маров и другие (СССР) высказали предположение о малой концентрации пыли в нижних слоях атмосферы и слабой ветровой эрозии.

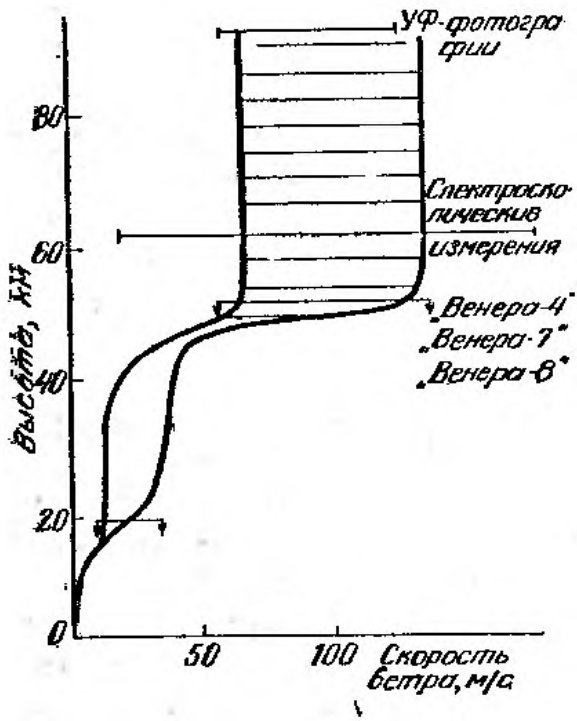

Рис. 6. Вертикальный профиль горизонтальной составляющей скорости (в направлении от под-земной точки к точке посадки).

Численное моделирование атмосферной циркуляции. Накопление значительного материала данных прямых измерений состава, структурных параметров и ветра на Венере, а также результаты численного моделирования общей циркуляции земной атмосферы создали основу для выполненных за последние годы теоретических работ по численному моделированию общей циркуляции венерианской атмосферы. Обстоятельный цикл работ в этом направлении выполнен советскими учеными С. С. Зилитинкевичем, А. С. Мониным и другими.

В упомянутом цикле работ на основе использования полной системы уравнений термогидродинамики для двухслойной модели (атмосфера разбивается на два одинаковых по массе слоя) в квазистатическом приближении впервые осуществлено численное моделирование общей циркуляции Венеры. Исходя из упомянутой системы уравнений определены широтная (u) и меридиональная (v) компоненты вектора горизонтальной ско-

рости, потенциальная температура (Θ) и давление на поверхности планеты (p_s). Располагая такими данными, можно вычислить температуру T, геопотенциал[1] Φ и аналог вертикальной компоненты скорости $\dot{\sigma}$ ($\sigma = p/p_s$). Рассмотренная система уравнений решена с учетом горизонтального турбулентного перемешивания и лучистого притока тепла.

Расчеты показали, что венерианская циркуляция почти симметрична относительно экватора, и ее источником является разность температур ночной и дневной сторон планеты (разность температур экватор—полюс практически отсутствует). Не наблюдается симметрии циркуляции как относительно оси вращения (подобно земной), так и относительно оси подсолнечная—противосолнечная точки: зона максимального нагрева заметно «отстает» от подсолнечной точки и располагается вблизи вечернего терминатора, тогда как наиболее холодная область наблюдается вблизи утреннего терминатора (в известном смысле это аналогично минимуму температуры в ранние утренние часы в суточном ходе температуры на Земле).

Расчет поля температуры показал, что разности температур в различных точках достигают 2,5°К, а средняя разность температур поверхности дневного и ночного полушарий составляет всего 1°К. Амплитуда вариаций давления у поверхности равна 80 мбар (среднее давление на дневной стороне на 28 мбар меньше, чем на ночной). Главной особенностью циркуляции являются ветры, направленные в нижней части атмосферы к зоне нагрева, где происходит подъем и растекание воздуха по направлению к области холода (рис. 7). Типичная скорость ветра составляет около 5,5 м/с, т. е. примерно вдвое меньше, чем на Земле (10 м/с). Однако поскольку плотность воздуха на Венере примерно в 50 раз выше, то ветровые давления в 10—15 раз превосходят земные. Кинетическая энергия единицы массы в северном и южном полушариях одинакова, но для дневной стороны она почти вдвое больше (18 м²/с²), чем для ночной (11 м²/с²). Широтным движениям соответствует примерно вдвое бо́льшая кинетическая энергия, чем меридиональным. Средняя зональная циркуляция

[1] Потенциальная энергия единицы массы относительно уровня моря (на уровне моря геопотенциал равен нулю).

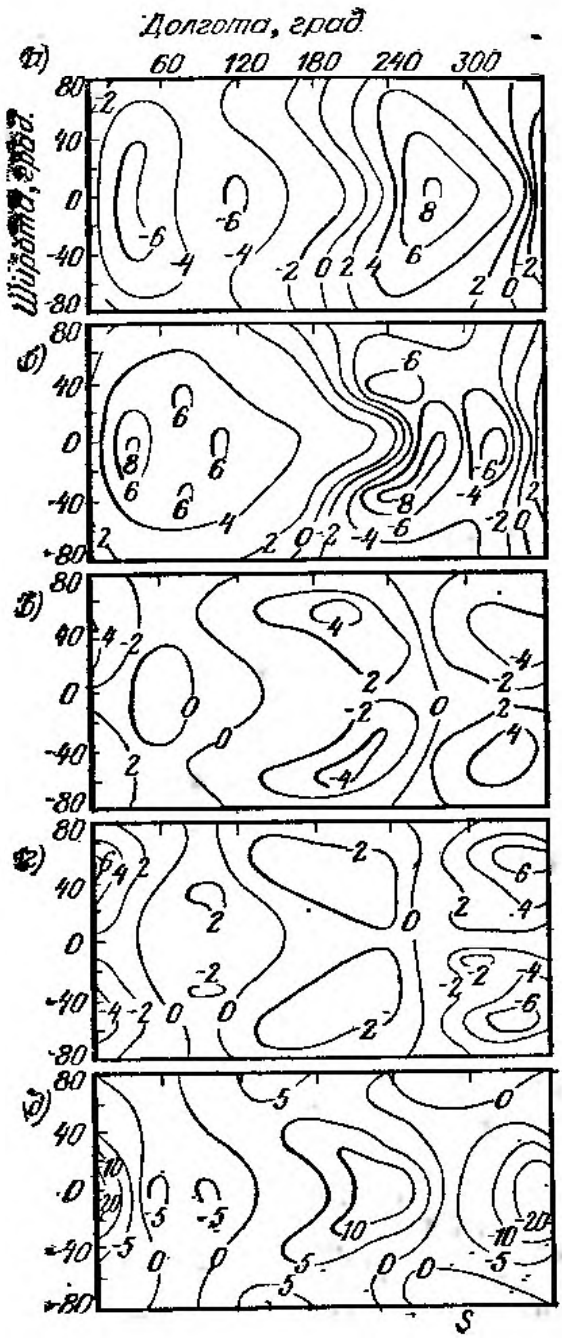

Рис. 7. Поле ветра на 140-е сутки по данным численного эксперимента (буквой S отмечено местоположение подсолнечной точки). а и б — широтная, в и г — меридиональные составляющие скорости (м/с) на нижнем и верхнем уровнях; д — аналог вертикальной скорости $\dot{\sigma}$ (10^7 c^{-1}) на уровне $\sigma = p/p_s = 0{,}5$ (положительные величины соответствуют нисходящим движениям, а отрицательные — восходящим).

выражена очень слабо: ее кинетическая энергия на три порядка величины меньше, чем энергия незональных движений. Характерной особенностью являются интенсивные вертикальные движения (рис. 7). Максимальные значения вертикальной скорости достигают нескольких сантиметров в секунду.

Нагревание нижней части атмосферы на дневной стороне обусловлено, главным образом, турбулентностью ($5{,}3 \cdot 10^{-7}$ °K/c), а охлаждение верхней атмосферы — радиацией ($2{,}4 \cdot 10^{-7}$ °K/c). В нижних слоях ночного полушария локальные притоки тепла отсутствуют, а в верхней атмосфере происходит радиационное охлаждение ($3{,}4 \cdot 10^{-7}$ °K/c). Вся венерианская атмосфера находится в состоянии конвективного перемешивания.

Аналогичное численное моделирование атмосферной циркуляции на Венере предпринял Т. Сасамори (США). Пренебрегая вращением планеты (и, следовательно, влиянием силы Кориолиса), а также обращением Венеры вокруг Солн-

ца (т. е. задавая неизменное во времени нагревание за счет поглощения солнечной радиации), Т. Сасамори рассмотрел циркуляцию на сфере в плоскости, содержащей подсолнечную и противосолнечную точки. Анализ роли газовой составляющей атмосферы в поглощении солнечной радиации привел к выводу, что основным фактором горизонтальной неоднородности радиационного нагрева атмосферы должно быть поглощение углекислым газом при второстепенном значении водяного пара (если отношение смеси для водяного пара составляет 10^{-3}). Расчеты показали, что отношение отраженной облаками солнечной радиации к пропущенной можно принять равным 8 : 2, так как это приводит к вполне достоверному альбедо 0,73 (7 и 20% радиации поглощается атмосферой, соответственно над и под облаком). Из условия баланса поглощенной солнечной и уходящей длинноволновой радиации найдено, что баланс соблюдается наилучшим образом при высоте верхней границы облаков 64 км. Это соответствует давлению $\sim$ 20 мбар, если толщина слоя облачности мала по сравнению со шкалой высот. Поскольку масса атмосферы над облаками мала (около 0,2% всей массы), то оказывается, что дифференциальное (по горизонтали) радиационное нагревание сильно сконцентрировано в облаках и над ними. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии принят равным 10^{10} см^2/с, а для коэффициента вертикальной диффузии взяты значения 10^5 и 10^6 см^2/с.

Т. Сасамори использовал восьмислойную модель атмосферы: слои с толщиной 10 км, а шаг по горизонтали (1067 км) взят равным 10° (по широте). Расчеты лучистого притока тепла сделаны с шагом по вертикали, составляющим 2 км. Ввиду большой тепловой инерции венерианской атмосферы в качестве начальных распределений давления и температуры взяты не произвольные совокупности этих величин, а значения, согласующиеся с данными измерений АМС «Венера-4» и «Маринер-5». В соответствии с этим в качестве начальных приняты однородные распределения давления (109,3 атм) и температуры (304°К) у поверхности, а вертикальный перепад температур задан как адиабатический (начальная скорость ветра везде равна нулю). Численное моделирование на основе использования упрощенной системы уравнений движения, неразрывности и притока тепла

показало, что время «разгона» атмосферы (от состояния покоя) составляет около одного месяца, после чего имеют место лишь слабые осцилляции горизонтальной компоненты ветра с периодом 4—5 земных суток. На рис. 8 представлены полученные на 80-е сутки вертикальные профили температуры и ветра в некоторых характерных точках (пунктиром изображены начальные распределения). Положительные значения скорости соответствуют направлению от подсолнечной точки к противосолнечной точке.

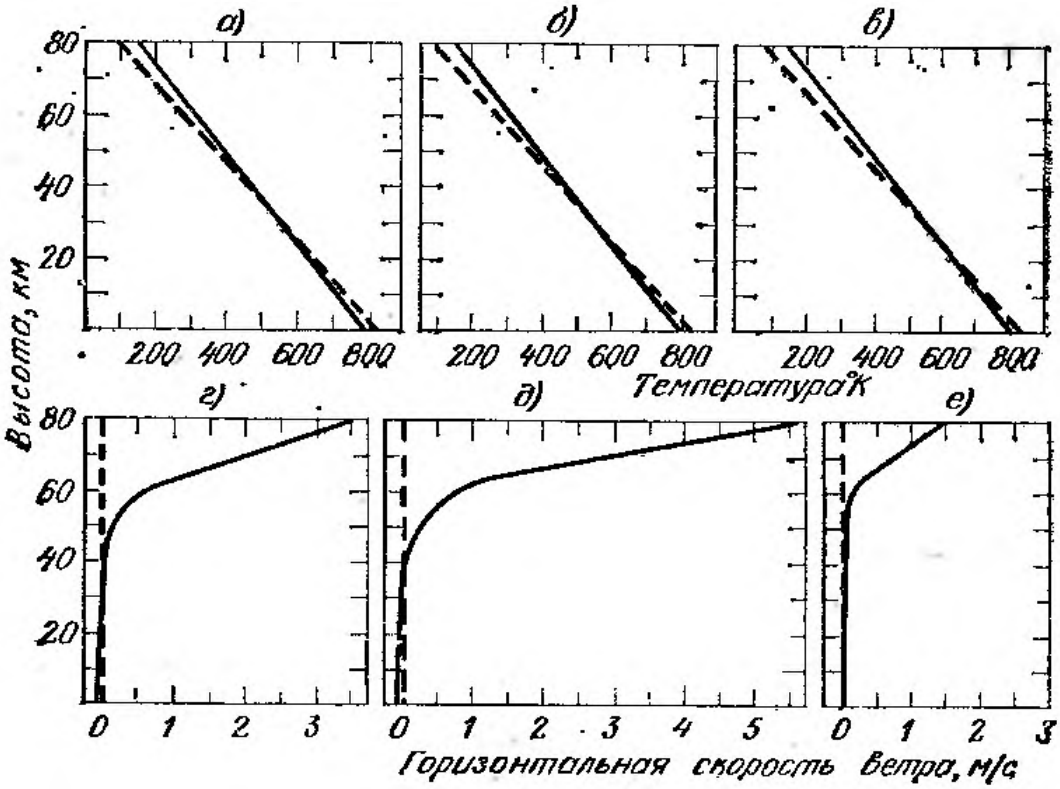

Рис. 8. Вертикальные профили температуры (рис. 8, а, б, в) и горизонтальной составляющей скорости ветра (рис. 8, г, д, е) по данным расчета на 80-е сутки: а — подсолнечная точка (φ — угловая координата, отсчитываемая от подсолнечной точки, равная 0°); б — терминатор ($\varphi = 90°$); в — противосолнечная точка ($\varphi = 180°$); г — $\varphi = 45°$; д — $\varphi = 90°$; е — $\varphi = 135°$.

Как видно, вертикальное распределение температуры, которое было первоначально нейтральным (адиабатическим), оказывается немного устойчивым (вертикальный перепад температур несколько меньше адиабатического). Горизонтальный перепад температур практически отсутствует. Для вертикального профиля ветра характерно возрастание скорости с высотой, но даже на

больших высотах ветер все еще остается слабым по сравнению с данными «Венеры-8» (см. рис. 6). Естественно, что результаты численного моделирования не выявляют чего-либо, напоминающего четырехсуточную циркуляцию, поскольку задано «неподвижное» Солнце. Вблизи поверхности планеты ($\varphi = 45$ и $90°$) отмечаются очень слабые ветры, направленные в сторону подсолнечной точки.

Заключая обсуждение результатов численного моделирования атмосферной циркуляции на Венере, можно сделать следующий вывод: все предложенные модели дают картину распределения ветров, которая оказывается значительно упрощенной по сравнению с тем, что обнаруживают результаты наблюдений. Такую ситуацию можно признать вполне естественной, поскольку сделаны лишь первые шаги на пути создания теории венерианской атмосферной циркуляции.

Марс

Успешные запуски к Марсу АМС «Маринер» и «Марс» принесли много новых сведений об этой планете. Анализ телевизионных изображений Марса существенно расширил, в частности, понимание атмосферных условий на этой планете. Прежде всего это относится к явлению глобальных пылевых бурь, характерные черты которых состоят в том, что: 1) они являются сравнительно частыми; 2) благоприятные условия образования бурь возникают лишь на высоких плато, расположенных вблизи южной тропической зоны в период солнцестояния в южном полушарии; 3) для развития бури необходимы скорость ветра более 30 м/с и условия циклонической циркуляции; 4) очаги бури обычно перемещаются в направлении с востока на запад; 5) первоначальное пылевое облако имеет, вероятно, орографическое (обусловленное рельефом) происхождение и увеличивается в размерах, приобретая антициклоническое направление движения; 6) ближайшим земным аналогом очага бури является ураган (именно используя модель урагана, удалось описать эволюцию марсианской пылевой бури на всех ее стадиях вплоть до распада).

Величины яркостной температуры Марса, определенные В. И. Морозом и другими (СССР) по данным измерений при помощи АМС «Марс-3» уходящего тепло-

вого излучения планеты в диапазоне длин волн 8—40 мкм, варьируются от 160 до 180°К, что значительно превосходит равновесную температуру, рассчитанную в предположении отсутствия атмосферы. Причиной такого различия средних температур является парниковый эффект.

Косвенное зондирование марсианской атмосферы, по данным спектральных измерений уходящего теплового излучения в период пылевой бури, установило, что атмосфера была значительно более прогретой, чем при отсутствии пыли, а вертикальный перепад температуры оказался существенно меньшим. После диссипации пылевой бури температура упала примерно на 30°К, а ее вертикальное изменение приблизилось к адиабатическому, что свидетельствует о наличии интенсивного перемешивания. Использование данных о распределении температур позволило рассчитать поле геострофического ветра[1], указывающее на существование суточного хода ветра. Имеются факты, указывающие на существование атмосферных фронтов и, в частности, конвекции за холодным фронтом.

В период функционирования «Маринера-9» происходила медленная диссипация южной полярной шапки, но ее остатки (возможно — водяной лед) наблюдались даже на широте 60° ю. ш. Судя по скорости диссипации, толщина полярной шапки, состоящей из сухого льда углекислоты, составляет всего несколько сантиметров. Относительно северной полярной шапки предполагается, что ее толщина достигает 1 км. Однако поскольку через каждые 25 тыс. лет элементы орбиты Марса изменяются таким образом, что северный полюс оказывается обращенным к Солнцу в перигелии, то в такие периоды северная шапка должна полностью диссипировать, и поэтому атмосферное давление может повышаться примерно до 1000 мбар, следствием чего является повышение температуры по крайней мере на 40°К. Это может периодически создавать на Марсе условия, благоприятствующие жизни. Однако так как оценки запасов CO_2 на Марсе противоречивы, то вывод о возможности повышения атмосферного давления до 1000 мбар следует считать предельной гипотетической оценкой.

---

[1] Геострофическим называют ветер, возникающий при равновесии сил давления и Кориолиса.

Под влиянием обнаружения морфологических структур марсианской поверхности, напоминающих высохшие русла рек, были высказаны предположения о палеоклимате Марса, который мог напоминать современный земной климат. В связи с этим американский ученый Т. Оуэн высказал соображения о возможности проверки гипотезы относительно циклических колебаний климата, которые иногда сопровождались, в частности, возникновением потоков воды в экваториальной области. Основой такого рода гипотез служит предположение о наличии значительных резервуаров легко испаряющихся веществ в твердой фазе (льды) в полярных шапках (нагревание полярных шапок могло приводить к переходу летучих компонент в атмосферу, увеличению атмосферного давления, росту парникового эффекта и т. д.).

Если атмосфера Марса возникла (подобно земной атмосфере) в результате дегазации твердой оболочки, которая сформировалась путем аккреции материала одинакового состава, то соотношение содержания благородных газов (например, $Ne^{20}:Ne^{32}:Ar^{36}$) в марсианской атмосфере должно сохраняться таким же, как и на Земле. При этом следует учесть, что присутствие Ar^{36} характерно для первоначальной («первобытной») атмосферы. В атмосфере Земли 99% аргона существует в виде изотопа Ar^{40}, являющегося продуктом распада K^{40} в горных породах и последующей дегазации.

Предполагая в соответствии с имеющимися оценками, что количество «захваченного» полярными шапками Марса углекислого газа эквивалентно примерно 1 атм, и учитывая, что давление у поверхности составляет 5,5 мбар, можно сделать вывод: современная атмосфера Марса содержит около 0,33 мбар Ar^{40}. Если же исходить из того, что весь углекислый газ находится в атмосфере, то это приводит к оценке содержания аргона порядка $2 \cdot 10^{-3}$ мбар. Различия между этими предельными оценками содержания аргона столь велики, что измерения истинного содержания аргона при помощи масс-спектрометра, разработанного для планируемых АМС «Викинг», могут стать основой проверки гипотезы об изменениях климата на Марсе и предположения о гораздо более массивной атмосфере Марса в прошлом. Измерения соотношения между содержанием упомянутых изотопов аргона и неона могут быть критерием справедливости аналогии эволюций Марса и Земли. Отметим в

связи с этим, что В. Г. Истомин и другие (СССР) при анализе данных АМС «Марс-6» получили содержание Ar, равное 35 ± 10%. Важное значение будут иметь данные о химическом составе твердой оболочки Марса.

Рассмотрим теперь результаты теоретических расчетов циркуляции марсианской атмосферы.

Наиболее полное численное моделирование общей циркуляции атмосферы Марса осуществлено К. Леови и Е. Минцем (США). В основе предпринятого ими расчета общей циркуляции атмосферы лежит интегрирование полной системы уравнений термогидродинамики.

При расчетах использовалась сферическая сетка с шагами 9° по долготе и 7° по широте. Двухуровневая структура в вертикальном направлении соответствовала значениям $\tau = p/p_s = 1/4$ и $\sigma = 3/4$, что эквивалентно высотам, примерно равным 12 км и 3 км. Давление на уровне поверхности принято равным $p_s = 5$ мбар. Расчеты проводились для чисто углекислой атмосферы. Приток тепла определен с учетом поглощения солнечной радиации атмосферой и поверхностью планеты, а также лучистого и конвективного теплообмена. Принята во внимание скрытая теплота, связанная с возможностью конденсации или сублимации углекислого газа на поверхности.

Расчеты изменения со временем средней полной кинетической энергии K (вычисленной для всей атмосферы), средней зональной кинетической энергии $\bar{K}$ (осредненной по долготе) и средней кинетической энергии возмущений $K' = K - \bar{K}$ показали, что «разгон» атмосферы занимает 7—8 марсианских суток (сутки на Марсе составляют 24 ч 37 мин). Очевидно, что такая малая «инерционность» атмосферы Марса связана с ее малой (относительно Земли и Венеры) массой.

На рис. 9 изображены осредненные меридиональные профили зональной (плюс соответствует ветру с запада) и меридиональной (плюс соответствует ветру с юга) компонент ветра. Сплошная и пунктирная кривые характеризуют профили ветра на верхнем ($\sigma = 1/4$) и нижнем ($\sigma = 3/4$) уровнях модели. Эти данные показывают, что в низких широтах имеют место заметные меридиональные потоки, указывающие на существование интенсивной меридиональной циркуляции с восходящими движениями в субтропиках южного (летнего) полушария и нисходящими — в северном полушарии.

В средних широтах северного полушария господствуют западные ветры с мощным струйным течением на верхнем уровне, а в южном полушарии преобладают слабые восточные ветры. Рассмотренные данные соответствуют десятому дню эксперимента, когда средняя зональная кинетическая энергия достигла относительного максимума. Для 14-х суток, когда кинетическая энергия имела относительный минимум, были характерны ослабление и расширение зоны струйного течения. Аналогичные изменения происходили и при тех же фазах изменения кинетической энергии в дальнейшем.

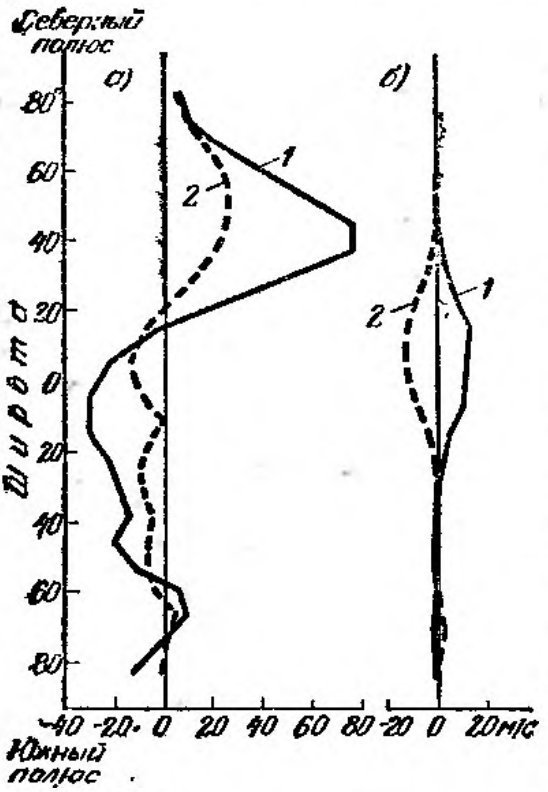

Рис. 9. Меридиональные профили зональной (а) и меридиональной (б) компонент ветра: 1 — верхний уровень; 2 — нижний уровень.

Американские ученые Р. А. Ханел и другие сделали приближенные расчеты величины ветра на среднем уровне (10 км) с использованием данных об измеренном распределении температур. На рис. 10 представлены результаты, полученные при использовании данных о температуре, осредненных за период с 1-го по 85-й виток (результаты, относящиеся к низким широтам, где не сказывается влияние силы Кориолиса, очень ненадежны). Наиболее типичной особенностью распределения ветра является, по этим расчетам, присутствие сильной компоненты суточных атмосферных приливов. Сопоставление распределения ветра с данными расчетов в геострофическом приближении[1] показывает, что в условиях Марса последнее совершенно неприемлемо. Сравнение рис. 9 и 10 позво-

[1] В предположении, что ветер геострофический (см. примечание на с. 46).

ляет в известной мере оценить реалистичность результатов численного моделирования и указывает на существование значительных расхождений.

На рис. 11 изображены меридиональные профили средних температур поверхности и атмосферы на 14-е сутки эксперимента (сплошные кривые). Для сравнения

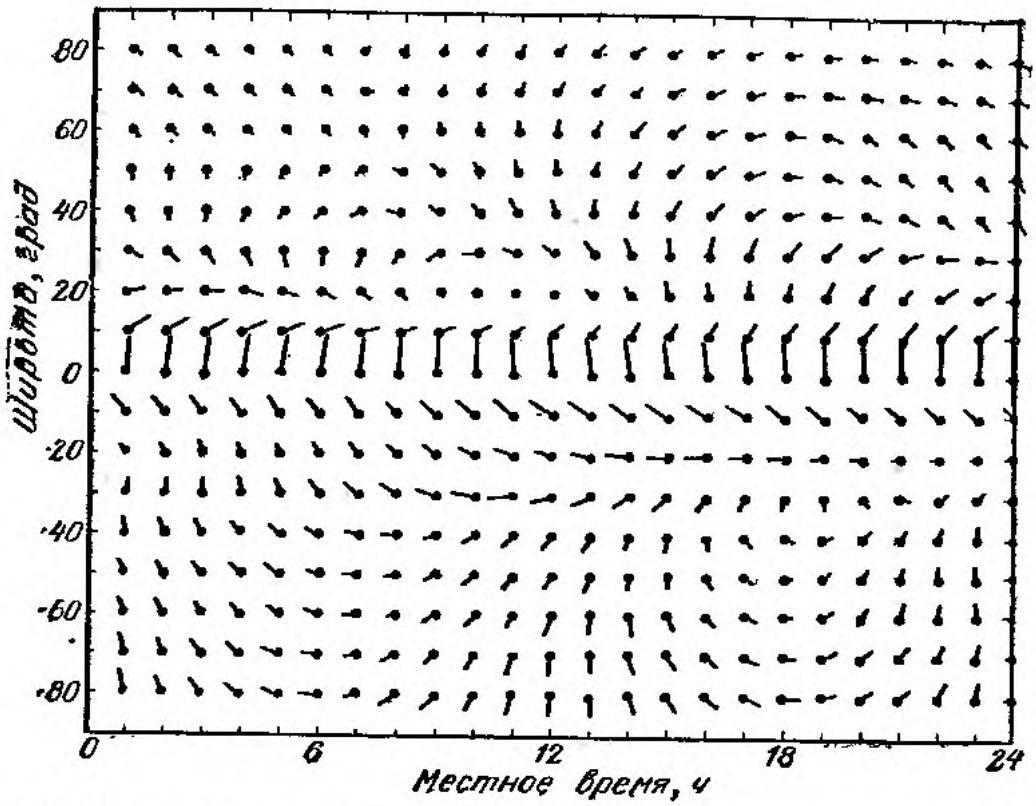

Рис. 10. Поле ветра на высоте 10 км, рассчитанное по измеренному полю температуры (модуль вектора ветра, равный расстоянию между точками, соответствует скорости ветра 50 м/с).

пунктиром показаны профили средних температур, полученные без учета влияния циркуляции (модель, радиационно-конвективного равновесия). Как видно, температура поверхности мало зависит от особенностей циркуляции. Однако температура атмосферы существенно изменяется при учете циркуляции. Так, например, вертикальный перепад температур в тропиках уменьшается за счет циркуляции более чем в 2 раза. Не менее заметное влияние оказывает циркуляция и на широтные перепады температур, уменьшая их.

Вертикальные прямые участки меридионального профиля температуры в высоких широтах северного (зимнего) полушария указывают на развитие полярной шап-

ки, состоящей из твердой углекислоты. При численном моделировании эта шапка появилась на вторые сутки и стабилизировалась к шестым суткам. Ее шриина согласуется с максимальной наблюдавшейся шириной и мало зависит от атмосферной циркуляции. Температура воздуха над полярной шапкой не опускается много ниже точки коиденсации CO_2, иесмотря на радиационное охлаждение атмосферы, что является результатом «подогрева» за счет планетной циркуляции.

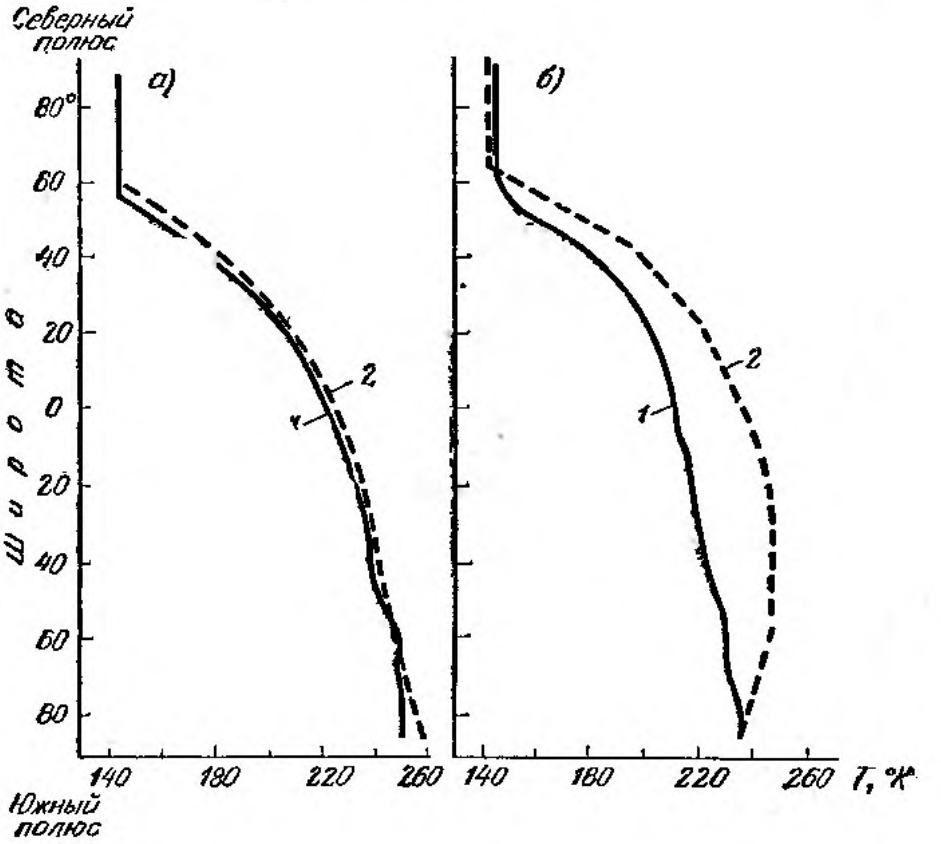

Рис. 11. Меридиональные профили средних температур поверхности (а) и атмосферы (б) на 14-е сутки численного эксперимента: 1 — с учетом циркуляции; 2 — без нее.

Расчет планетарных распределенний температур за различиые моменты времени показал, что в северном полушарни в профиле температуры на верхнем уровие постепенно выявляется формированне режима циркуляции в умеренных широтах, напомниающей земную циркуляцию. На раиних стадиях развития длинные атмосферные волны смещаются на восток со скоростью от 15 до 70 м/с, ио, достигая стадии полного развития, становят-

ся устойчивыми, а в некоторых случаях начинают перемещаться в противоположном направлении.

В зимнем полушарии имеет место близкое соответствие между распределениями температуры и ветра на верхнем уровне, тогда как для летнего полушария характерно доминирующее влияние суточных приливов с очень четким обращением профиля ветра через каждые 12 ч. Суточные приливы определяют и особенности распределений ветра и давления вблизи поверхности.

Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Марса указывает на существование заметных суточных вариаций температуры и кинетической энергии. Интересной особенностью циркуляции на Марсе является сильное влияние суточных атмосферных приливов. Весьма важным является и согласующееся с экспериментом заключение о возможности образования и параметрах зимней полярной шапки из твердой углекислоты.

Существенный недостаток рассмотренных расчетов — пренебрежение влиянием орографии и разного рода облаков: облаков из CO_2, водяного пара и пылевых облаков. Особенно заметное влияние на общую циркуляцию планеты могут оказывать пылевые облака, возникающие при сравнительно частых на Марсе пылевых бурях.

Поскольку нагревание марсианской атмосферы за счет поглощения солнечной радиации пылью может быть вполне типичным явлением, это может вызвать целый ряд серьезных изменений в наших представлениях об атмосфере Марса: 1) наличие большой устойчивости повлияет на движения всех масштабов; 2) увеличение амплитуды суточного изменения температуры усилит влияние приливных эффектов; 3) отсутствие интенсивной конвекции существенно изменит характер общей циркуляции атмосферы; 4) изменение интенсивности турбулентного перемешивания в тропосфере и возрастание роли атмосферных приливов может серьезно повлиять на ход фотохимических процессов в ионосфере и на высоту турбопаузы[1]; 5) особенно интересны возможные эффекты взаимодействия пыли, радиации и атмосферных движений, которые могут, в частности, обусловить «взрывной» рост пылевых облаков под влиянием гори-

[1] Турбопауза — переходный слой, отделяющий область интенсивного перемешивания (турбулентности) от расположенной над ней зоны отсутствия турбулентности.

зонтальной силы давления, возникающий при появлении локального пылевого облака (именно такой характер имели процессы в атмосфере Марса в сентябре 1971 г.).

Подводя итоги численного моделирования общей циркуляции марсианской атмосферы, следует отметить, что уже первые попытки, предпринятые в этом направлении, дали обнадеживающие результаты, находящиеся в удовлетворительном согласии с экспериментом. На очереди более полное описание закономерностей марсианской общей циркуляции. Важное значение имеют работы по теории пылевых бурь, выполненные в настоящее время в СССР Г. С. Голицыным и другими.

Юпитер

Согласно данным АМС «Пионер-10» Юпитер представляет собой сгусток жидкого водорода и, возможно, лишен твердой поверхности (в лучшем случае планета имеет сравнительно небольшое твердое ядро, окруженное мощной атмосферой). В свете этих данных может показаться, что обсуждение проблем метеорологии Юпитера слишком абстрактно с точки зрения понятия метеорологии в земном смысле. Более внимательный анализ фактов выявляет, однако, значительный интерес для метеорологов к исследованиям Юпитера, так как на последнем осуществляется весьма своеобразная модель формирования теплового режима и общей циркуляции атмосферы. Быстрое вращение гигантской планеты, обладающей мощной атмосферой, малый поток тепла от Солнца (в 27 раз меньший, чем для Земли), и малое наклонение экватора к орбите, наличие внутреннего источника тепла, возможность влияния магнитогидродинамических эффектов в нижних слоях атмосферы и большая скорость вращения, значительно превосходящая скорость звука в атмосфере, — все эти и другие факторы определяют существенную специфичность метеорологии Юпитера (так же как и других планет-гигантов). Но именно специфичность созданной природой модели делает ее исключительно интересной в плане проблемы сравнительной метеорологии планет.

Полосы облаков. Основным индикатором общей циркуляции атмосферы на Юпитере является динамика облачного покрова. Согласно данным наблюдений динами-

ки облаков, на Юпитере преобладает очень интенсивная зональная циркуляция с периодом вращения от 9 ч 49 мин до 9 ч 59 мин, причем наиболее короткий период вращения характерен для экваториальной зоны. Но и в умеренных широтах наблюдаются сильные контрасты периода вращения на расстоянии по широте не более 10°.

Данные о зависимости скорости зональной циркуляции от широты обнаруживают ее асимметричность относительно экватора. Выявляются значительная изменчивость циркуляции от года к году и появление время от времени аномально высоких скоростей вращения в субтропических широтах. Для ярких зон характерно наличие антициклонического, а темных поясов — циклонического сдвигов.

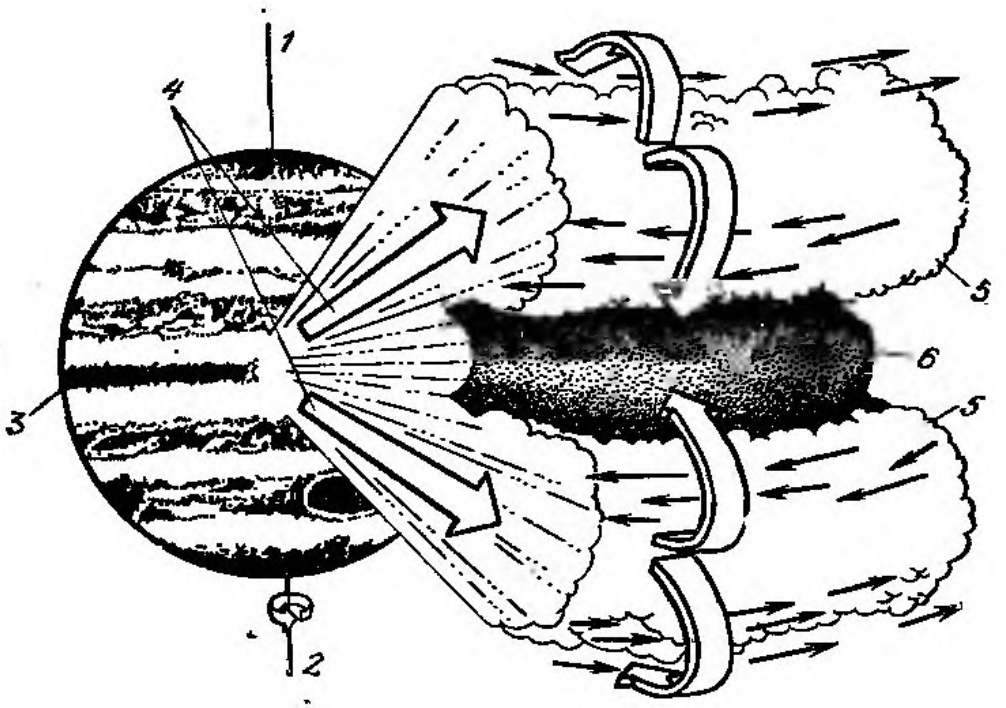

Рис. 12. Схема атмосферной циркуляции на Юпитере: 1, 2, — северный и южный полюса; 3 — экватор; 4 — восходящие потоки атмосферного газа; 5 — зоны; 6 — пояс.

Если «двигателем» атмосферной циркуляции на Юпитере является внутренний источник тепла, а не дифференциальное поглощение солнечной радиации зонами и поясами, то полосчатая структура Юпитера означает наличие конвекции, сопровождаемой подъемом теплых масс в области зон и опусканием холодных масс — в поясах. Таким образом, светлые зоны являются, по-видимому, облаками, а темные пояса — безоблач-

ными участками атмосферы. Именно такая схема циркуляции согласуется с данными АМС «Пионер-10» и «Пионер-11» (рис. 12).

Американский ученый П. Д. Гираш предложил упрощенную теорию полос облаков, наблюдаемых на Юпитере, основанную на рассмотрении неустойчивости, которая может возникнуть в атмосфере под влиянием радиационных факторов при смещении по вертикали горизонтально однородного облачного покрова. Экспериментальной основой теории послужили данные измерений распределения теплового излучения по диску Юпитера, указывающие на то, что темным поясам соответствуют максимальные величины излучения (факт изменчивости излучения можно трактовать как проявление существенных различий энергетического баланса, обусловленных влиянием малых компонент атмосферы).

Механизм радиационной неустойчивости, вызванной изменением концентрации конденсирующихся компонент атмосферы, обусловливает явления неустойчивости, обладающие такой же длиной волны и осевой симметрией, как на Юпитере. Имеет место также и неосесимметричная неустойчивость, сопровождаемая более короткими длинами зональных волн, которые подавляются трением (амплитуда этих волн максимальна в высоких широтах). Структура волн находится в согласии с полученным ранее по данным наблюдений выводом о том, что облачные зоны теплее, чем темные пояса.

Рассмотренный механизм неустойчивости не объясняет экваториального струйного течения на Юпитере. Возможно, что струйное течение обусловлено существованием вторичной неустойчивости, которая ответственна за перенос количества движения к экватору, определяющий существование этого течения. Если такой вывод справедлив, то теория общей циркуляции атмосферы Юпитера должна быть очень сложной. Другой причиной сложности явлений общей циркуляции является следующее обстоятельство: если рассмотренная теория неустойчивости адекватна действительности, то следует учитывать взаимообусловленность и состава атмосферы (концентрация конденсирующихся компонент), и энергетики, и динамики атмосферы. Возможные пути усовершенствования приближенной теории состоят в учете вертикальной структуры атмосферы, радиационного нагрева, трения и других факторов. Важное значение имеют в этой

связи измерения спектров теплового излучения планеты (при достаточной для различения поясов и зон пространственной разрешающей способности), а также измерения спектров отраженной солнечной радиации (для определения поглощенной Юпитером радиации).

Общая циркуляция атмосферы. Закономерности общей циркуляции атмосфер различных планет существенно специфичны. Поскольку наиболее полно изучены в настоящее время особенности общей циркуляции атмосфер Земли и Солнца, то целесообразно исследование общей циркуляции атмосферы Юпитера с использованием результатов, относящихся к Земле и Солнцу. Размеры Юпитера примерно на порядок величины больше, чем Земли, но на порядок меньше солнечных. Юпитер вращается вдвое быстрее Земли, тогда как скорость вращения Солнца составляет около 3% земной. Несомненно, что атмосфера Юпитера является гораздо более глубокой, чем земная, но по сравнению с размерами планеты все же представляет собой тонкую оболочку. Ввиду того что ось вращения Юпитера почти нормальна к плоскости орбиты, сезонные эффекты малы по сравнению с земными (этому способствуют также большое расстояние от Солнца и высокое альбедо Юпитера).

Источником энергии для циркуляции атмосферы на Юпитере в известной мере является поглощение солнечной радиации, вызывающее дифференциальное нагревание на экваторе и полюсах. Быстрое вращение планеты и другие факторы определяют зональность циркуляции. С другой стороны, некоторые факты указывают на существование интенсивного внутреннего источника тепла, который ответствен за дифференциальное нагревание по вертикали. Более того, этот источник тепла является, по-видимому, доминирующим. Хотя на Земле подобный источник тепла отсутствует, неравномерность поглощения солнечной радиации по высоте создает ситуацию, которую можно считать в определенном смысле аналогичной: циркуляция определяется общим влиянием дифференциального нагревания по горизонтали и вертикали (это обстоятельство до сих пор не учитывалось в достаточной мере). Такое положение имеет место и на Солнце, где мощный внутренний источник тепла определяет доминирующий характер дифференциального нагревания по вертикали, но влияние конвекции может вызы-

вать появление меридиональных перепадов температуры вблизи поверхности.

Важной особенностью юпитерианской атмосферы является резкий скачок зональной скорости ветра от величии порядка 100 м/с в полосе широт ±9° почти до нуля — за пределами экваториального пояса, за исключением узких зон сильного западного ветра около широты 20—25°, которые, однако, не являются столь устойчивыми, как экваториальное струйное течение.

Используя основные факторы, определяющие общую циркуляцию юпитерианской атмосферы и учитывая наблюдательные данные и выводы теории, американский ученый В. П. Старр построил схему меридиональной циркуляции. Учет ограничений, налагаемых законами сохранения массы, количества движения и момента количества движения, приводит к следующим выводам: 1) экваториальное ускорение вращения атмосферы нельзя объяснить на основе учета лишь осесимметричных движений, если не предполагать наличия отрицательной вязкости; 2) отклонения от симметрии в условиях вращающейся атмосферы (незональная конвекция вихревого типа) при наличии экваториального ускорения должны вызывать селективную передачу момента количества движения тем частицам, которые движутся по направлению максимума струйного течения, и «отбирать» его у частиц, перемещающихся в противоположном направлении; 3) касательные напряжения, определяющие передачу момента количества, возникают спонтанно при формировании упомянутых конвективных движений (обусловленных дифференциальным нагреванием по вертикали), которые зависят от долготы при соответствующих размерах конвективных ячеек.

Поскольку имеются данные, указывающие на то, что темные пятна на Юпитере имеют максимум повторяемости вдоль приэкваториальных зон сдвига ветра (±9° широты), то эти пятна можно интерпретировать как системы ячеек вертикальной конвекции, формирующиеся в слое атмосферы толщиной до 10 000 км и ответственные за возникновение больших величин момента количества движения в экваториальной полосе широт. Анализ некоторых других соображений о факторах общей циркуляции и сопоставление особенностей общей циркуляции атмосфер Юпитера, Земли и Солнца приводит к выводу об определенном сходстве с Землей, состоящем,

в частности, в том, что благодаря влиянию крупномасштабной турбулентности в земной атмосфере (подобно юпитерианской) возникают зоны аккумуляции момента количества движения (формирования струйных течений) на широтах $\pm 36°$, происхождение которых может быть истолковано в терминах отрицательной вихревой вязкости. Подобное явление существует, по-видимому, и в атмосфере Солнца. Кроме того, здесь, как и на Юпитере, должно существовать несколько характерных масштабов вертикальной конвекции.

Основной проблемой в понимании закономерностей общей циркуляции атмосферы на Юпитере и тропической циркуляции на Земле является вопрос о возможности существования упорядоченной циркуляции при наличии в атмосфере статической неустойчивости. Одна из наиболее простых классификаций схем циркуляции атмосфер связана с возможностью рассматривать бароклинную[1] и конвективную системы циркуляции. В первом случае циркуляция определяется наличием горизонтального (меридионального) перепада потенциальной температуры и переносом тепла по горизонтали от области тепла к области холода. Для второго случая характерны существование в качестве «движущей силы» вертикального перепада потенциальной или эквивалентнопотенциальной температур и перенос тепла снизу вверх. Наличие «гибридных» моделей (что соответствует условиям на Земле) определяет возможность достаточно широкого класса моделей циркуляции.

Однако пока что не была определенно установлена возможность существования конвективной модели циркуляции в масштабах целой планеты (атмосферные циркуляции на Земле, Марсе и Венере принадлежат к числу бароклинных; лишь тропическая атмосфера Земли может, в известной мере, служить примером конвективной циркуляции). По-видимому, только на Юпитере и Сатурне осуществляется простая система планетарной конвективной циркуляции. В данном случае этому способствует наличие доминирующего внутреннего источника тепла, о чем свидетельствуют общие черты циркуляций на Юпитере и Сатурне: 1) осесимметричная полосчатая система планетарной облачности, 2) сильные эк-

[1] Бароклинность характеризуется зависимостью плотности среды не только от давления, но и от других параметров.

ваториальные струйные течения, 3) сходные физические параметры (скорость вращения, высокое альбедо — около 0,6, малый эксцентриситет орбит). Однако имеется и специфичность условий формирования циркуляций: 1) разный наклон орбит к плоскости эклиптики (3° на Юпитере и 27° на Сатурне), 2) Сатурн получает в 4 раза меньше солнечной радиации, чем Юпитер, но его струйное течение в 4 раза более интенсивно.

Поскольку различие условий на Юпитере и Сатурне сводится к расхождению в величинах прихода солнечной радиации, то отсюда вытекает, что динамика атмосфер этих планет-гигантов определяется не условиями инсоляции (падающего потока солнечной радиации), а внутренним источником тепла. Для обоснования гипотезы о том, что атмосферная циркуляция на Юпитере обусловлена крупномасштабной конвективной неустойчивостью, вызванной внутренним источником тепла, американские ученые Г. П. Вильямс и Д. Б. Робинсон изучили закономерности конвекции в неустойчивой вращающейся атмосфере.

Расчеты привели к выводу о существовании на Юпитере тропического западного струйного течения, генерируемого осесимметричным потоком при условии, что атмосфера является сравнительно «мелкой». При наличии сильной диффузии тропического струйного течения зона западно-восточного переноса охватывает всю полосу экваториальных широт. Такого рода диффузия может быть обусловлена лишь влиянием крупномасштабных неосесимметричных возмущений. Осесимметричность конвективных «валов» (т. е. их устойчивость по долготе) определяется широтной изменчивостью величины $\Omega \cos \Theta$ (Ω — угловая скорость вращения планеты, Θ — широта, отсчитываемая от полюсов). Именно эта изменчивость, определяющая условия возникновения конвекции, подавляет упорядоченную крупномасштабную конвекцию в зоне широт более 45°, тогда как на экваторе конвекция проявляется очень четко.

На рис. 13 представлены результаты вычислений для северного полушария полей линий тока, температуры, зональной компоненты скорости u и вертикальной скорости w для случая, который рассматривается как наиболее реалистический.

Полосчатая структура циркуляции и поле зональной компоненты скорости ветра достаточно хорошо воспро-

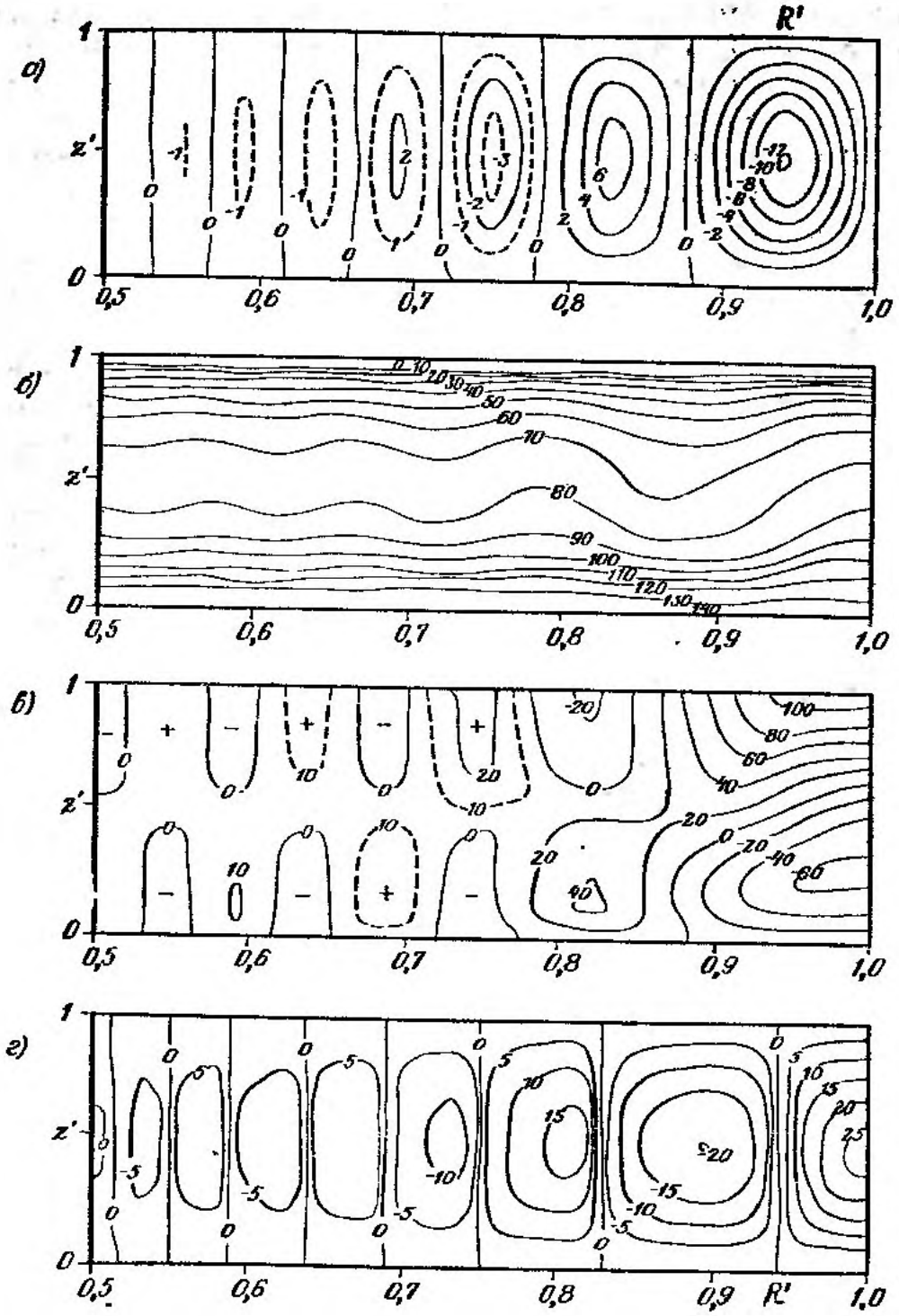

Рис. 13. Поля линий тока (а), температуры (б), зональной компоненты скорости (в) и вертикальной скорости (г) для наиболее реалистической модели атмосферной циркуляции на Юпитере. Обозначения координат имеют следующий смысл: $z' = r/d$ безразмерная высота (d — толщина слоя атмосферы); $R' = 2\Theta/\pi$ (Θ — дополнение до широты) — безразмерное дополнение до широты ($R' = 0$ на полюсе и $R' = 1$ на экваторе).

изводят наблюдаемые особенности атмосферной циркуляции на Юпитере, выявляя существование пяти зон восходящих ($w > 0$) и четырех поясов нисходящих ($w < 0$) движений с характерным для них широтным градиентом зонального переноса. С удалением от экватора интенсивность и ширина полос уменьшаются. В полярных областях упорядоченные крупномасштабные движения «подавляются» вращением, но здесь проявляется неупорядоченная мелкомасштабная циркуляция.

Вне экваториальных полос компоненты скорости u (горизонтальная) и w (вертикальная) взаимосвязаны таким образом, что экваториальная сторона зон ($w > 0$) движется в направлении, противоположном вращению планеты ($u < 0$), а полярная половина перемещается в противоположном направлении ($u > 0$). Обратное справедливо (но в менее четко выраженной форме) для поясов ($w < 0$). Эти выводы соответствуют данным наблюдений, свидетельствующих о наличии дифференциального вращения внутри полос Юпитера.

Высотное экваториальное струйное течение, скорость которого достигает 100 м/с ($u > 0$), сопровождается расположенным под ним противотечением, имеющим скорость 60 м/с (рис. 13, в). Между этими струйными течениями и областью отсутствия упорядоченной крупномасштабной циркуляции, начинающейся на широте 45°, располагаются попеременные полосы положительного и отрицательного зональных потоков, которые коррелируют с полосчатой структурой Юпитера, причем потоки положительного знака являются более мощными. Вблизи нижней и верхней границ атмосферы формируются тепловые «пограничные» слои (рис. 13, б), а в толще атмосферы наблюдаются температурные волны. Ступенчатый меридиональный профиль средней вертикальной скорости определяет существование четко очерченных широтных зон однородного по интенсивности переноса. Расчеты, выполненные с целью оценки устойчивости осесимметричного потока к долготным возмущениям, показали, что наиболее вероятными геометрическими формами возмущений являются овалы и струи.

Одним из наиболее интересных и пока еще загадочных проявлений общей циркуляции атмосферы Юпитера является Большое Красное Пятно. Подобно другим особенностям видимой структуры поверхности Юпитера, Большое Красное Пятно (БКП) представляет собой

крупномасштабную облачную систему. На Земле подобные системы облачности являются либо перемещающимися системами с продолжительностью жизни около 1—2 недель, которые характеризуют особенности погоды, либо квазиперманентными, обусловленными распределением континентов и океанов.

Поскольку БКП существует по крайней мере 100 лет, естественно предположить по аналогии, что оно определяется спецификой твердой подстилающей поверхности. Подобное объяснение связано, однако, с некоторыми трудностями: 1) возможно, Юпитер не имеет твердой поверхности, а если она и существует, то на расстоянии тысяч километров под облаками; 2) скорость вращения БКП изменчива и меньше скорости вращения твердой оболочки планеты. Эти обстоятельства побуждают рассматривать модели циркуляции атмосферы Юпитера без учета взаимодействия с подстилающей поверхностью.

В 1970 г. Г. С. Голицын предложил рассматривать БКП как свободный долгоживущий вихрь. Американский ученый А. П. Ингерсолл рассмотрел кинематическую модель стационарных «свободных потоков», которая хорошо воспроизводит многие свойства БКП, а также зон и поясов Юпитера и не предполагает какого-либо специального механизма, обусловливающего формирование БКП. БКП с точки зрения динамики подобно зонам, которые наряду с более темными поясами составляют главные черты осесимметричной полосчатой структуры Юпитера. Анализ данных наблюдений приводит к выводу, что БКП и зоны являются областями хорошо развитой облачности, антициклонических вихрей и восходящих движений, тогда как для поясов характерно наличие низкой и тонкой облачности, циклонической циркуляции и нисходящих движений.

А. П. Ингерсолл показал, что подобная БКП эллипсообразная система линий тока может возникать как вихрь в свободной атмосфере, не связанный с каким-либо влиянием (например, орографическим) подстилающей поверхности. Длительность существования БКП следует приписать слабости диссипативных процессов на Юпитере. Физическим фактором, поддерживающим описанную циркуляцию в свободной атмосфере, может быть дифференциальное радиационное охлаждение верхнего и нижнего ярусов облачности. Остается, однако, неясным вопрос об устойчивости циркуляции (в зем-

ных условиях бароклинные потоки, обусловленные горизонтальным перепадом температур, неустойчивы). Возможно, что на Юпитере бароклинная неустойчивость либо подавляется, либо выражается в форме осесимметричных возмущений.

Заключение

Даже краткое обсуждение проблематики сравнительной метеорологии планет убедительно свидетельствует о том, что наиболее привлекательные перспективы исследований планет должны быть связаны с осуществлением согласованных программ исследований, имеющих целью не решение частных задач, относящихся к отдельным планетам, но поиски общих закономерностей, раскрывающих особенности процессов, происходящих в атмосферах и на поверхностях планет. Поэтому первоочередное внимание должны привлекать такие процессы и явления, которые обнаруживают как черты сходства, так и специфичности. Подобный подход является взаимообогащающим и обещает наиболее важные практические результаты с точки зрения более глубокого понимания (и, следовательно, возможности прогноза) процессов и явлений, происходящих в земной атмосфере. Выше было приведено много примеров, иллюстрирующих этот вывод. Подводя итоги, отметим еще раз первостепенную актуальность исследований атмосферной циркуляции и свойств поверхностей планет, а также природы облаков, вертикальных профилей теплового баланса и его составляющих. Что касается проблемы облаков, то для ее решения необходимы данные об их химическом составе, микроструктуре, оптических свойствах, вертикальных и горизонтальных макронеоднородностях, динамике облачного покрова. Важное значение имеет в этой связи изучение плотных и более теплых нижних слоев атмосферы (их химического состава, полей температуры и ветра и других характеристик). Понимание процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью невозможно без наличия надежной информации о механических и физико-химических свойствах и оптических характеристиках грунта. Выявление закономерностей общей циркуляции требует не только гораздо более обширных наблюдательных

данных о циркуляции, но и достаточно полных сведений об энергетике атмосферы. Важное место должны занять в этой связи исследования малых газовых и аэрозольной компонент атмосферы, изучение условий турбулентной диффузии и конвекции и т. д. Обширный круг вопросов включают проблемы верхней атмосферы.

К числу возможных средств исследований принадлежат АМС, функционирующие в режиме пролета и искусственных спутников, а также спускаемые аппараты. С таких аппаратов могут выпускаться дрейфующие в атмосфере шары-зонды. Главными задачами спускаемых аппаратов и шаров-зондов должны быть прямые измерения, что является наиболее важным, а АМС-спутники могут быть применены для определения различных параметров методами дистанционной индикации. Несомненно, что серьезную роль должны играть в будущем и наземные оптические и радиоастрономические исследования. Обширные данные наблюдений потребуют, конечно, еще более значительных усилий с целью теоретического обобщения полученных результатов.

Автор выражает признательность доктору Б. К. Муррею за любезное предоставление оригиналов фотографий, изображенных на рис. 1—4.

ЛИТЕРАТУРА

Голицын Г. С. Введение в динамику планетных атмосфер. Л., Гидрометеоиздат, 1973.

Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М., «Знание», 1973.

Динамика атмосферы Венеры (Под редакцией С. С. Зилитинкевича и А. С. Монина). Л., «Наука», 1974.

Кондратьев К. Я., Бунакова А. М. Метеорология Марса. Л., Гидрометеоиздат, 1973.

Кондратьев К. Я. Сравнительная метеорология планет. Л., Гидрометеоиздат, 1973.

Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. М., «Наука», 1974.