

На правах рукописи

Липатов Александр Николаевич

**Методы, приборы и результаты исследования
метеорологических параметров атмосферы Венеры и Марса**

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной
физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук



Москва
2008

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы Института космических исследований РАН

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Линкин Вячеслав Михайлович (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

кандидат физ.-мат. наук

Петросян Аракел Саркисович (ИКИ РАН)

доктор физ.-мат. наук

Хаврошкин Олег Борисович (ИФЗ РАН)

Ведущая организация:

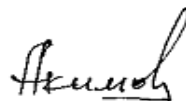
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМАШ) , 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4.

Защита состоится 20.01.2009г. в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.113.01 при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д.84.32, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « 18 » декабря 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 002.113.01



Акимов В.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию физических параметров атмосферы Венеры и Марса с помощью метеокомплексов (метеорологические приборы, интегрированные в единый комплекс) и малых зондов, устанавливаемых на космические аппараты.

Основные направления и актуальность исследований

Изучение Венеры и других планет, близких к Земле по своим свойствам, является базисной задачей в понимании природы процессов, происходящих в нашей Солнечной системе. Изучая сегодняшние процессы, происходящие на планетах, мы можем лучше описать их прошлое и заглянуть в будущее. Эти знания важны в первую очередь для сравнительной планетологии: на какой стадии эволюции появились расхождения или каждая планета имела свою индивидуальную историю рождения и развития. Еще совсем недавно мы очень мало знали о планетах нашей Солнечной системы. Только вторая половина двадцатого века в корне изменила ситуацию. Человечество, наконец, проникло в космос и стало исследовать эти планеты космическими аппаратами. До этого момента Венера, закрытая плотными облаками, считалась планетой, похожей на Землю. Теперь мы знаем, что у планет имеется много отличий, и пытаемся понять их природу. Наиболее похожие на Землю планеты - это Марс и Венера. Марс близок по основным характеристикам: наклону плоскости экватора, длительности суток и ряду атмосферных процессов (сезонные явления, температурные условия, наличие аэрозольной компоненты в атмосфере). Характеристики Венеры близки к земным по массе, размеру и общему тепловому балансу. Но, конечно, эти планеты имеют большие принципиальные отличия своих характеристик от земных. Например, средняя температура на Марсе существенно ниже земной, а на Венере она значительно выше. Марс имеет сильно разреженную атмосферу, а Венера - очень плотную. Химический состав также сильно отличается. На Земле основные компоненты - азот и кислород, а на Марсе и Венере - углекислый газ. История измерения температуры поверхности Венеры началась в шестидесятых годах с радиозондирования с Земли в диапазоне сантиметровых волн, для которых атмосфера прозрачна. Уже тогда удалось оценить температуру у поверхности, которая оказалась 400°C. Остальные параметры оставались неизвестными. Только с помощью космических аппаратов - "Маринер-2", "Венера-7,8" - удалось получить информацию о других параметрах планеты. Эти измерения принесли много информации: высокое давление атмосферы у поверхности - до 90атм; высокая температура - от 730 до 740К; огромная по земным

масштабам скорость вращения атмосферы - от 0 у поверхности до 140 м/с в верхней атмосфере; позднее названная суперротацией; избыток первичных инертных газов; малое содержание воды; мощный парниковый эффект; отсутствие магнитного поля у планеты и т.д.

Исследования Венеры и Марса проводились как с орбиты (методами дистанционного зондирования), так и с помощью спускаемых аппаратов (контактными методами). Оба метода измерения дополняли друг друга и давали более полную информацию о процессах на планетах. При исследовании атмосферы Венеры применение дистанционных методов не всегда приемлемо из-за непрозрачности для зондирующих электромагнитных волн плотного облачного слоя (например, для ИК-спектрометрии). Поэтому контактные методы всегда оставались актуальными. Первый этап исследования начинался в 60-х годах и активно продолжался до середины 80-х. К настоящему времени всего к Венере успешно слетали 15 советских космических аппаратов (различные аппараты “Венера” и два аппарата “Вега”), 7 американских (“Пионер-Венера”, “Маринеры”) и 1 аппарат европейской миссии (“Венера-Экспрес”). Последовательность проведения этих исследований представлена в работах (Мороз В.И., Хантрес В.Т., Шевалев И.Л., 2002; Huntress W.H., Moroz V.I., Shevaley I.L., 2002). По результатам миссии “Пионер-Венера” была построена модель средней атмосферы “Venus International Reference Atmosphere” (VIRA), опубликованная в 1985 году в журнале “Advances in Space Research” (Kliore A, Moroz V.I. Keating G., 1985). Последнее исследование Венеры советскими аппаратами было осуществлено в миссии “Вега”.

Данная диссертация в основном базируется на результатах экспериментов, проведенных на спускаемом аппарате (СА), аэростатных зондах (АЗ) в атмосфере Венеры миссии “Вега”. В диссертации также представлены результаты предыдущих экспериментов - миссии “Венера -15,16” - и дальнейшее развитие этих экспериментов в последующих миссиях, “Марс-96”, “Mars-Surveyor-Program-98”.

Одной из основных задач на сегодняшний день является создание глобальной модели циркуляции атмосферы Венеры и Марса. Для решения этой задачи необходимо иметь как можно больше экспериментальных данных о профилях температуры и давления и полей скорости атмосферных масс. Естественно, что от объема информации зависит достоверность модели. Для Земли такая модель существует, которая построена на основе априорной базы данных по температурным профилям. Для атмосферы Марса часто используют модели общей циркуляции, которые позволяют сформировать базу

температурных профилей. Это Европейская модель EMGCM (Forget et al., 1999; Lewis et al., 1999 и др.). А для Венеры она только рождается.

Первые исследования Венеры проводились в 60-х годах с помощью наземных наблюдений (Мороз В.И., Хантрес В.Т., Шевалев И.Л., 2002; Huntress W.H., Moroz V.I., Shevaley I.L., 2003). Позднее, к 80-м годам, были получены основные сведения о поверхности Венеры и ее атмосфере. Был обнаружен неизвестный УФ-поглотитель (Pollack et al., 1979,1980; Zasova et al.,1981), который обеспечивает поглощение 70% энергии в атмосфере на высотах от 55 до 100км. В атмосфере обнаружена суперротация, которая, возможно, возникает в результате солнечных термических приливов (Pollack et al., 1979,1980; Zasova et al.,1981; Esposito et al., 1997; Krasnopolsky et. al.,1989, 2006). Были получены подробная информация о химическом составе атмосферы (В.Г.Гельман, В.Г.Золотухин, Б.В.Казаков, и др., 1979) и много других данных.

Тем не менее оставалось множество белых пятен, к которым прибавились вопросы, возникающие в результате предыдущих исследований. В 80-х годах эти работы были продолжены, но после этого наступил большой перерыв в исследовании Венеры практически по настоящее время. Только в 2006 г. исследования были продолжены на европейском аппарате “Венера-Экспрес”.

Атмосферу Венеры условно можно разделить на мезосферу, среднюю и нижнюю атмосферу. В построенной модели атмосферы информация о термической структуре мезосферы основывалась на акселерометрических экспериментах на “Венерах-8,11-14” (Авдеевский и др. 1979,1983; Avduevsky et al., 1983; Черемухина и др., 1974), и экспериментах по радиопросвечиванию на КА “Пионер-Венера” (Kliore and Patel, 1980, 1982; Kliore 1985, Kliore et al., 1985), “Венерах-9, 10, 15, 16” (Yakovlev et al., 1987, 1991) и “Магеллане” (Jenkins et al, 1994; Hinson&Jenkins, 1995), кроме того, по наблюдениям с ИК-картирующим радиометром на КА “Пионер-Венера” (Taylor et al., 1980, 1983; Schofield, Taylor , 1982, 1983).

Изучение средней атмосферы базировалось в основном на спектрометрических измерениях в миссии “Венера-15” (Moroz et al.,1986; Эртель и др., 1984, 1985; Oertel et al., 1987, 1989) и на спускаемых аппаратах контактным методом (Seiff A., et al. 1980, Marov M.Ya., et al., 1980, Ragent B., Blamont J., 1980). Изучение нижней атмосферы проводилось в основном контактным методом на спускаемых аппаратах и радиозондированием. На основе перечисленной выше информации, в рамках Международной Референтной Модели Атмосферы Венеры VIRA (Kliore, 1985; Seiff et al., 1980, 1983, 1985), была построена температурная модель средней атмосферы для пяти широтных зон.

Хочется отметить, что к моменту проведения миссии “Вега” на советских и американских аппаратах задача не была выполнена в полном объеме либо из-за большой погрешности (на советских аппаратах “Венера”), либо из-за отсутствия измерений на высотах ниже 10 км (у американских аппаратов “Пионер-Венера”). Как позднее оказалось, модель имела хорошее совпадение с полученными нами данными, но также и значительные расхождения. Для подтверждения или корректировки построенной модели необходимо было иметь полный вертикальный профиль температуры и давления для разных широт и долгот с точностью 1 К. Поэтому проведение экспериментов по измерению температуры и давления и других параметров на спускаемом аппарате и зондах оставалось к тому времени (середина 80-х годов) актуальным. Решать эти задачи нужно было в комплексе, в противном случае нельзя было уложиться в указанные сроки и с заданными техническими ограничениями. Для решения этой задачи были рассмотрены различные методы измерения и выбраны наиболее подходящие для ее решения. Сейчас можно сказать, что большой объем предварительных испытаний, исследований был залогом успешного проведения эксперимента, а реальный эксперимент подтвердил правильность выбранных решений и дал уникальную информацию об атмосфере планеты.

Методы исследования

Эксперименты на спускаемом аппарате и плавающих зондах основаны на контактных методах измерения. Дистанционный метод использовался только на аэростатном зонде в эксперименте по измерению плотности аэрозоля. Контактный метод особенно эффективен при изучении Венеры, где очень плотная атмосфера и нижние слои не доступны большинству дистанционных методов. Хочется особенно подчеркнуть, что впервые в космических исследованиях в качестве измерительного инструмента контактного метода применялся аэростатный зонд. Для земных исследований атмосферы - это ординарный инструмент, но для атмосферы Венеры - это была пионерская работа. Для зондов был разработан комплекс аппаратуры, направленный на изучение атмосферы Венеры по основным параметрам: температуре, давлению, вариациям скорости ветра, меридиональной скорости движения аэростата, измерению излучения поверхности в полосе около 1 мкм и плотности аэрозоля вдоль всей трассы полета. Помимо этого были разработаны методики измерения этих параметров, произведен расчет влияния физических параметров окружающей среды на точность измерения, рассчитаны допустимые граничные условия полета аэростатного зонда в течение всего срока существования.

Цель настоящей работы:

- Разработка и создание метеокомплексов для проведения измерений давления, температуры, вариаций скорости ветра, вариаций плотности аэрозоля и инфракрасного излучения в миссиях “Венера-15,16”, “Вега”.
- Разработка и создание малых зондов для проведения измерений давления, температуры, вариаций скорости ветра и вариаций плотности аэрозоля и других параметров в миссиях “Фобос”, “Марс-96”, Mars-Surveyor-Program-98.
- Создание программного обеспечения (ПО) для обработки полученных экспериментальных данных.
- Получение экспериментальных данных по вертикальным и долготным профилям температуры, давления, вариаций плотности аэрозоля, вертикальной и меридиональной скорости ветра и инфракрасного излучения поверхности в атмосфере Венеры.
- Обработка и анализ информации, полученной с приборов во время натурного эксперимента в миссии “Вега”.

Новизна работы

Проведение научных исследований на других планетах всегда было уникально и индивидуально по своей сути. После нескольких попыток, наконец, был получен полный вертикальный профиль температуры и давления атмосферы Венеры с точностью 1 К.

Осуществлен первый в мире эксперимент по исследованию атмосферы другой планеты с помощью аэростатов на высоте дрейфа 53...54 км.

Проведены длительные исследования динамики атмосферы в части измерения температуры, давления, вертикальной и горизонтальной компонент скорости ветра и их пульсаций.

Проведены длительные исследования вариаций плотности аэрозоля и измерение уровня излучения поверхности планеты вдоль трассы полета в ближнем ИК-диапазоне (в окне прозрачности около 1 мкм).

В результате экспериментов были получены новые данные об основных параметрах атмосферы Венеры.

Научная и практическая ценность

Впервые в миссии “Вега” получены с высокой точностью (не хуже 1К) вертикальные профили температуры и давления атмосферы Венеры начиная с высоты 64 км и до поверхности. Проведены измерения температуры, давления, вертикальной компоненты скорости ветра и

излучения поверхности Венеры в инфракрасном диапазоне во время двухсуточного полета аэростатных зондов на высоте 53...54 км на широтах северного и южного полушарий (7°3 с. ш. и 6°6 ю. ш.). Были разработаны методики и приборы, которые могут быть использованы для получения научной информации по основным параметрам атмосферы (температуры, давления, вертикальной и горизонтальной скорости ветра, плотности аэрозоля и излучения поверхности). Результатом проведенной работы являются созданный научный комплекс и малые автономные зонды, включающие приборы, методику, алгоритмы и программное обеспечение для широкого применения в исследовании планет Солнечной системы. Применение аэростатных зондов в миссии "Вега" обеспечило продолжительные измерения (нескольких суток) в атмосфере планеты с целью постоянного слежения за ее глобальной циркуляцией. Применение нескольких плавающих зондов в последующих миссиях позволит получить поля скоростей зонального термического ветра и турбулентные коэффициенты диссипации и переноса энергии, трения в атмосфере. Такие исследования позволят создать более точную глобальную модель циркуляции. На сегодняшний день в план работ Российского космического агентства по исследованию планет в Солнечной системе включены миссии по изучению Венеры и Марса, позволяющие проведение вышеуказанных исследований с помощью спускаемых и плавающих зондов. Результаты проведенной работы могут быть использованы в этих миссиях.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на семинарах по Физике планет в ИКИ РАН, а также на международных конференциях: Генеральных ассамблеях COSPAR (начиная с 1992 г.), сессиях Европейского геофизического Союза EGU, Департамента планетных наук Американского астрономического общества DPS AAS, Европейских планетных конгрессах Europlanet и на многих других совещаниях.

Всего по теме было опубликовано более 40 работ. Список 20 наиболее важных из них приведен в конце автореферата.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны приборы и методики для измерения температуры, давления, пульсаций температуры, плотности аэрозольной компоненты, вертикальной и зональной скорости ветра и излучения поверхности в диапазоне 1 мкм. Проведена калибровка приборов метеокомплексов, показавшая правильность принятых технических решений и методик.

2. Создана база данных по профилям температуры, давления и пульсаций температуры, плотности аэрозольной компоненты,

вертикальной и зональной скорости ветра и излучения поверхности в диапазоне 1 мкм атмосферы Венеры, полученная в результате проведенного натурального эксперимента на спускаемом аппарате (Метеокомплекса-СА) и аэростатного зонда (Метеокомплекса-А3) в миссии "Вега".

3. Проведены обработка и научный анализ данных метеокомплекса спускаемого аппарата в миссии "Вега", на основе которых получены следующие научные результаты:

- обнаружена инверсия в средней атмосфере планеты на высоте 58...63 км, подтверждающая данные предыдущих дистанционных измерений;
- впервые обнаружены изотермические слои в средней атмосфере Венеры на высотах от 37 до 54 км;
- впервые обнаружена изотермия в приповерхностном слое Венеры;
- выявлена разность температур в 0,3...0,7 К между температурой поверхности и температурой нижнего (приповерхностного) слоя атмосферы Венеры;
- обнаружена зона статической неустойчивости атмосферы на высотах 2...4 км и подтверждены, прямым методом, данные о зонах статической неустойчивости на высотах 18...20 и 49...55 км;

4. Проведены обработка и научный анализ данных метеокомплекса аэростатного зонда в миссии "Вега", на основе которых получены следующие научные результаты:

- впервые получена мелкомасштабная термическая структура облачного слоя на высотах 50...54 км;
- обнаруженная корреляция температуры и давления термической структуры в облачном слое близка к адиабатической;
- впервые обнаружена разность температур в 6,5К при одинаковом давлении для атмосферных масс полета двух зондов;
- измеренная турбулентность подтверждает существование в атмосфере на данной высоте как мелкомасштабной, так и крупномасштабной турбулентности;
- обнаруженные средние значения вертикальной скорости ветра превышают полученные ранее для этих высот;
- впервые обнаружена корреляция вертикальной скорости ветра и высоты рельефа поверхности;
- обнаружено тепловое излучение поверхности на длине волны 1 мкм в окне прозрачности атмосферы Венеры;
- обнаружена корреляция изменения величины плотности аэрозоля с нисходящими потоками и увеличением температуры;
- измеренные вариации плотности аэрозоля оказались незначительными и составляют величину 20% от среднего значения;

- отсутствует грозовая активность в облачных слоях на высотах 50..54 км и ниже в течение длительного периода времени (46 ч).

5. Разработаны прибор “Фурье-спектрометр” и методика для исследования атмосферы Венеры дистанционным методом (ИК-спектроскопия) миссии “Венера -15,16”. Правильность технических решений подтверждена калибровкой прибора и полученными результатами.

6. Создана база данных по спектрам инфракрасного диапазона для высот от 55 до 100 км, полученных с фурье-спектрометра в миссии “Венеры -15,16”. На основе данных “Венеры -15,16” и “Веги” была усовершенствована Международная Референтная Модель Атмосферы Венеры - VIRA: построена модель средней атмосферы, зависящая от местного времени, VIRA-2 (Мороз В.И., Засова Л.В. и др.).

7. Разработаны приборы и методики долгоживущей автономной станции (ДАС) миссии “Фобос”. Проведена калибровка приборов автономной станции.

8. Разработаны приборы и методики малой автономной станции (МАС) миссии “Марс- 96”. Проведена калибровка приборов малой автономной станции.

9. Разработаны приборы лидар Lidar и датчик давления ДД для миссии Mars-Surveyor-Program-98 и проведены калибровки приборов.

Личный вклад автора состоит в его участии на всех этапах работы - от постановки задачи до обработки и анализа результатов. Все результаты диссертационной работы являются актуальными, представляют научную ценность и получены при решающем вкладе автора.

Содержание работы

Работа состоит из пяти глав, введения, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации 140 страниц.

Во введении представлен общий обзор рассмотренных в диссертации проблем, направленных на изучение атмосферы Венеры и Марса, обоснована актуальность темы исследования и сформулирована цель работы. Определяется круг задач, в которых не хватает полноты данных по измерениям температуры и давления. Подчеркивается важность данной работы в исследовании атмосферы Венеры для создания теории глобальной циркуляции атмосферы.

Глава 1. Глава посвящена выбору методов и датчиков для проведения экспериментов, а также приводятся расчеты основных характеристик выбранных датчиков. В параграфе 1.1. приводятся обобщенные результаты по исследованию Венеры, полученные до

миссии “Вега”, которые включают общие характеристики и интересующую нас термическую структуру. На этом этапе о Венере было известно, что она имеет большой период вращения (ретроградный). Синодический период обращения Венеры (солнечные сутки) составляет 117 земных суток. Сидерический период обращения равен 243 земных суток. Химический состав атмосферы в основном представляет углекислый газ (CO_2) – 96,5% – с примесью азота (N_2) – 3,5%. На остальные газы, такие как окись углерода (CO), двуокись серы (SO_2), водяной пар (H_2O), аргон (Ar), гелий (He) и прочие компоненты, приходится менее 0,1%. Венера - единственная планета земной группы - имеет самую мощную атмосферу, у которой отношение массы атмосферы к массе планеты составляет $0,86 \cdot 10^{-6}$. Для Земли это отношение на два порядка меньше. Венера имеет плотный облачный слой (толщиной до 20 км), основной компонент которого - сернистый аэрозоль и ряд других неизвестных соединений. Верхняя граница облаков располагается на высоте 65...70 км. В зависимости от времени суток и широты высота границы меняется. Температура и давление у поверхности составляют соответственно 730 К и 90 атм.

Глобальная циркуляция атмосферы представляет собой уникальное явление, названное суперротацией, в которой слои средней атмосферы движутся с различными скоростями - от 80 до 140 м/с. Таким образом, атмосфера на этих высотах делает полный оборот вокруг планеты за 3,1...5,5 земных суток в экваториальной зоне. Скорость движения зависит от высоты над поверхностью и широты. Суперротация атмосферы Венеры была впервые обнаружена по изображениям облачного покрова, полученным из наземных наблюдений (Boyer и Guerin, 1969). Это явление было повторно обнаружено на автоматической межпланетной станции (АМС) “Маринер-10” (1973-75 гг.) (Limaye и Suomi, 1978). Позднее наличие среднеширотного ветрового джета над облаками было подтверждено данными, полученными АМС Pioneer Venus (PV) (Limaye, 1989) и Galileo (Belton *et al.*, 1991; Toigo *et al.*, 1994) из ультрафиолетовых наблюдений за движением облачного покрова, а также из расчетов зонального термического ветра, основанных на данных радиопросвечивания PV (Newman *et al.*, 1984; Walterscheid *et al.*, 1985), и посадочными аппаратами “Венера” по доплеровскому сдвигу радиосигналов.

На сегодняшний день мы знаем, что эти данные были подтверждены в проекте “Вега”, дополнены данными по анализу температурных профилей, полученных методом ИК- спектроскопии в эксперименте “Фурье-спектрометр” на “Венере-15”. (Moroz *et al.*, 1986; Эртель и др., 1984, 1985; Oertel *et al.*, 1987, 1989), Galileo NIMS (Ross-Serote *et al.*, 1995), и данными, полученными в результате обработки наблюдений в

миллиметровом диапазоне Кланси и Мюлеман (1991) и Леллуш и др. (1994); зафиксированы их ежегодные вариации.

Структура модели VIRA для атмосферы Венеры включает нижнюю ($H < 50$ км) и среднюю ($H = 50 \dots 100$ км) атмосферу. Иногда границей считают 60 км, уровень, определяемый средним значением высоты тропопаузы, полученным по измерениям на "Пионер-Венера" и "Венера-15,16" (Яковлев О.И., Губенко В.Н. и др.// Косм. исследования, 1987; Kliore A. and Patel V.,// Icarus,1982). Модель VIRA состоит из высотных профилей температуры, давления и плотности и разделена на три слоя: 0...40 км, 40..60 км и 60..100 км. Эти слои отличаются в основном по методам исследования, хотя проходящие в них процессы имеют различные физические условия. Рассмотрим нижнюю модель атмосферы для высот $h < 40$ км. Модель атмосферы в этом интервале высот была построена на основе измерений, полученных на СА "Венера-10,12" и "Пионер-Венера". Ниже 12 км существовали только измерения с невысокой точностью (полученные на "Венере-10"), на основании которых была построена модель этого слоя. Типичное отличие температурных профилей составляет несколько градусов, которое зависит от широты, местного времени и ряда других причин. Этих данных не достаточно для получения зависимостей температуры от широты или местного времени. По полученным данным, имеющим малое расхождение, была принята единая модель строения атмосферы в этой области высот. Максимальное отличие от модели для локальных значений температуры может составлять 10 К при средних вариациях около 5 К. Из модели следует, что нижняя атмосфера в основном устойчива к конвекции. Исключение имеет область высот от 20...30 км. Рассмотрим теперь модель нижней атмосферы в диапазоне высот 40..60км. По данным радиопросвечивания "Пионер-Венера" были получены профили атмосферы для разной широты. Было выбрано пять широтных зон: $\varphi < 30^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi = 75^\circ$ и $\varphi = 85^\circ$ (где φ -градус широты). На этих высотах атмосфера также стабильна за исключением $h = 50 \dots 57$ км (среднего облачного слоя).

И, наконец, рассмотрим модель средней атмосферы в диапазоне высот 60...100 км. Данные для моделирования брались по результатам эксперимента "Инфракрасный Радиометр" (OIR), по радиопросвечиванию, по акселерометрическому эксперименту проекта "Пионер-Венера" и по советским "Венерам". Для 5 широтных зон построены высотные профили. Из модели видно, что зависимость средней температуры от долготы в экваториальной атмосфере изменяется солнечно-связанным образом и описывается полусуточной волной термического прилива. Аналогичные периодические вариации описаны для "холодного воротника" и - для "горячего диполя" с

периодами 5,9 и 2,9 дней соответственно. Надо отметить, что модель нижней атмосферы (интервал высот 0...32 км) не учитывает широтных или синоптических вариаций. Такая модель атмосферы Венеры может служить априорной базой данных для создания модели глобальной циркуляции атмосферы.

В целом, для создания полной модели глобальной циркуляции необходимо решить систему уравнений, которая включает уравнение движения сплошной среды (уравнение Навье-Стокса), характеризующего изменение плотности импульса вязкой среды; уравнение непрерывности; уравнение состояния сплошной среды и уравнения изменения энергии и энтропии в вязкой среде. Решение системы этих уравнений в аналитическом виде - сложная задача и, как правило, не решаемая. Для решения этой задачи используется в основном метод машинного моделирования, который позволяет создать приближенную модель циркуляции. Для Венеры, например, медленно вращающейся планеты, состояние динамики ее атмосферы определяется так называемым циклострофическим балансом (Leovy, 1973; Schubert, 1983; Gierasch et al., 1997), когда центробежная сила, действующая на единичную массу, уравновешивается меридиональной компонентой градиента давления:

$$\frac{u^2 \operatorname{tg}(\varphi)}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y},$$

где u – зональная скорость ветра в м/с, φ – широта, P – давление, y – локальная меридиональная декартова координата, ρ – плотность атмосферы. К этому уравнению надо добавить уравнение гидростатического равновесия:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g,$$

и уравнение геопотенциала:

$$\Phi \equiv \int_0^{z_p} g dz,$$

где g – ускорение свободного падения, z_p – высота, на которой определяется геопотенциал Φ . С помощью этой системы уравнений можно получить зависимость, связывающую скорость зонального термического ветра с широтным температурным градиентом. Решается задача численным методом, на основе априорной базы данных в виде профилей температуры и давления. Очевидно, что для усовершенствования модели базы данных необходимо иметь:

- 1) вертикальные профили температуры и давления атмосферы.
- 2) долготные и широтные профили температуры и давления атмосферы.

В дальнейшем мы рассмотрим, как согласуются данные “Веги” с ранее существовавшей моделью и что нового они дали для ее усовершенствования. Таким образом, накопленный материал дал направление необходимых измерений и определил диапазон и точность измеряемых физических параметров атмосферы, предлагаемых для исследования в миссии “Вега” на спускаемом аппарате и аэростатном зонде. Результат обобщения этих данных был сведен в табл.1.

В параграфе 1.2. проводится анализ по выбору метода измерения (контактный или бесконтактный) температуры и давления, показаны их недостатки и преимущества. В основном выбор контактного метода был основан на технических и конструктивных ограничениях, существовавших в миссии. Для эффективного решения поставленной задачи в работе проводится сравнительный анализ чувствительных элементов по физическому принципу измерения.

Таблица 1. Диапазоны величин измеряемых параметров атмосферы Венеры в миссии “Вега”

Параметр	Диапазон	Точность	Чувствительность
Температура (К): для СА для АЗ	От 240 до 730 От 300 до 350	1 0,1	0,1 0.05
Давление (бар): для СА для АЗ	От 0,01 до 90 От 0,5 до 0,7	0,5% 0,001	0,1% 0,0005
Скорость ветра (м/с): для СА для АЗ	От 1 до 80 От 0,2 до 15	1% 0,1	0.5% 0,05
Коэффициент обратного рассеяния ($\text{м}^{-1} \text{ср}^{-1}$):	От 10^{-6} до 10^{-2}	5%	1%
Интенсивность свечения поверхности на 1 мкм ($\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ср}$)	От 10^{-5} до 10^{+4}	10%	1%

Для контактного метода были рассмотрены следующие принципы измерения:

- 1) манометрический;
- 2) на основе зависимости расширения вещества от температуры;

- 3) на основе зависимости электрического сопротивления от температуры;
- 4) термоэлектрический;
- 5) на основе электрофизических явлений.

Таким образом, из большой группы рассмотренных физических принципов измерения выбор был остановлен на группе 3 как наиболее подходящей по многим параметрам для миссии "Вега". После выбора метода и чувствительных элементов на основе физического принципа измерения был проведен патентный поиск и анализ датчиков промышленно выпускаемых в Советском союзе и зарубежных странах, краткий отчет о котором приведен в приложении.

В параграфе 1.3. рассмотрен круг вопросов, на основе которых формируется база параметров для создания физической модели датчика. В эту базу данных включаются как физические, так и конструкторско-технические параметры. Таким образом, были сформированы граничные условия для физической модели датчиков. На основе сформированной базы параметров можно было определить реальные характеристики датчиков температуры и давления. В параграфах 1.3.1-1.3.5 приводятся расчеты характеристик каждого выбранного типа датчика (рассчитываются конструктивные, электрические и физические параметры) в соответствии с предъявленными требованиями.

В итоге для миссии были приняты следующие решения:

- использовать датчики температуры проволочные низкоомные платиновые и пленочные на основе никеля - два проволочных платиновых датчика (один - открытого типа, а другой - закрытого), два пленочных никелевых датчика (один - открытого типа, а другой - закрытого); датчики устанавливать с выносом в невозмущенную зону набегающего потока;
- использовать датчики давления мембранного типа с последующим преобразованием деформации мембраны в выходной пропорциональный электрический сигнал - три датчика на три диапазона с перекрытием по диапазонам; датчики низкого и среднего давлений устанавливать снаружи для обеспечения нормальных условий простыми средствами защиты; датчик высокого давления - внутри спускаемого аппарата;
- провести разработку и изготовление датчика высокого давления, так как необходимый аналог не был найден.

В главе 2 представлено описание экспериментов миссии на спускаемом аппарате и на аэростатном зонде. В параграфе 2.1 описана общая структура всей миссии. На рис.1 схематически

представлены основные этапы снижения спускаемого аппарата и ввода аэростатного зонда.

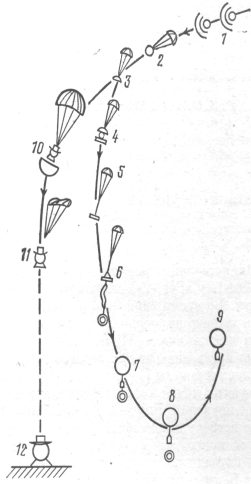
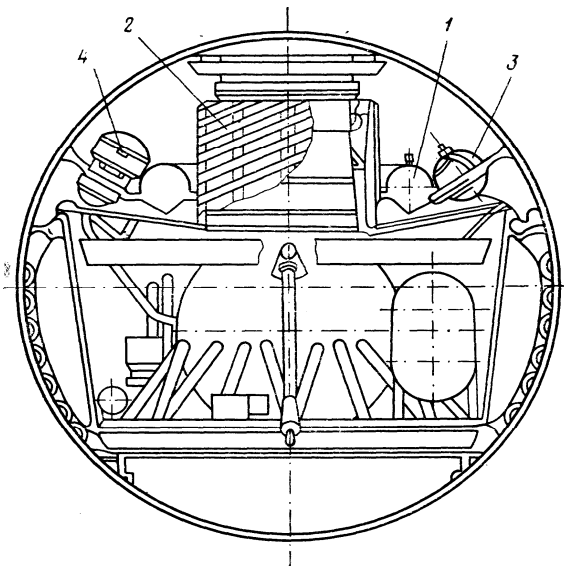


Рис. 1. Основные этапы снижения спускаемого аппарата и ввода аэростатного зонда: 1 - вход в атмосферу; 2 - раскрытие парашюта, удаляющего верхнюю полусферу (теплозащитная оболочка состоит из двух полусфер); 3 - удаление верхней полусферы; 4 - отделение аэростатного зонда; 5 - раскрытие парашюта, вытягивающего оболочку; 6 - развертывание и наполнение оболочки; 7 - отделение парашюта с системой наполнения; 8 - отделение балласта; 9 - выход аэростата на высоту дрейфа (~ 54 км); 10 - сброс нижней полусферы, начало передачи телеметрической информации (< 63 км); 11 - отделение парашюта; 12 - посадка.

Конструкция спускаемого аппарата вместе с аэростатным зондом представлена на рис.2.



зонда: 1 - тороидальный контейнер, 2 - передающая антенна спускаемого аппарата, 3 - баллоны высокого давления с гелием, 4 - парашютный контейнер.

Рис.2. Спускаемый аппарат и размещение на нем оборудования аэростатного

Временные параметры, координаты, высоты и другие важнейшие характеристики миссии даны в табл.2.

Таблица 2. Временные параметры, координаты и другие данные СА и АЗ аппаратов “Вега -1,2”.

Параметр	“Вега-1”	“Вега-2”
Дата старта КА “Вега -1,2”	15.XII. 1984	21.XII.1984
Дата посадки СА “Вега -1,2”	11.VI. 1985	15.VI. 1985
Момент раскрытия парашюта (T_3) и начала приема информации СА *	5ч 06 мин 25 с	5 ч 06 мин 19 с
Момент отделения парашюта	5ч 15 мин 20 с	5 ч 15 мин 14 с
Момент контакта с поверхностью	6ч 08 мин 42 с	6 ч 06 мин 46 с
Координаты точек посадки СА, град:		
широта	8,1	-7,5
долгота	176,9	179,8
Зенитное расстояние Солнца, град	169,3	164,5
Высота в момент раскрытия парашюта**, км	63±0,5	63±0,5
Высота отделения парашюта, км	46±0,5	46±0,5
Высота точки посадки, км	-0,6±0,1	+0,1±0,1
Давление у поверхности, атм	95	91
Температура атмосферы у поверхности***, К	740	734
<i>Высота дрейфа АЗ, км</i>	54...53	54...53
Дальность активного полета АЗ, км	11500	11000
Длительность связи Земли с АЗ, ч	46	46
Давление на высоте дрейфа АЗ, атм	0,5...0,6	0,5...0,6
Температура на высоте дрейфа АЗ, К	300...310	308...316

* Здесь и далее время московское, соответствующее приему сигнала на Земле.

** Здесь и далее относительно уровня 6052 км.

*** Для “Веги-2” - по данным измерений, для “Веги-1” - по модели.

В параграфе 2.2. приводится подробное описание метеокомплекса, установленного на спускаемом аппарате. Рассмотрены их основные характеристики и режимы работ. Важное место уделяется проблеме размещения датчиков на спускаемом аппарате, репрезентативности измерений метеорологических параметров. На рис.3 представлено размещение датчиков на спускаемом аппарате.

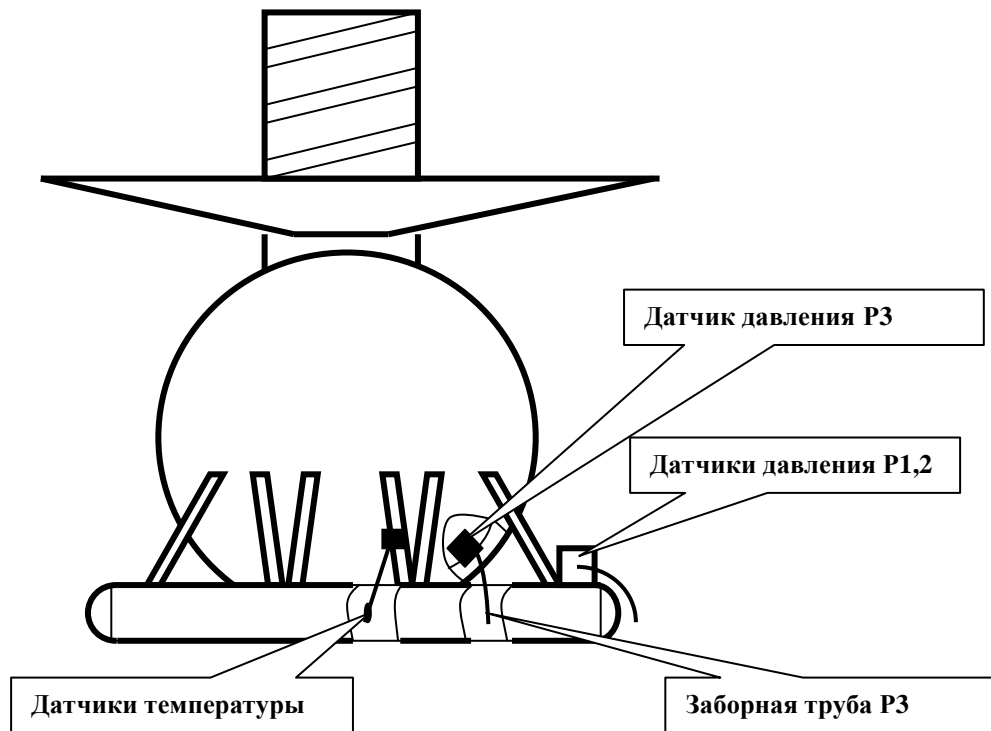


Рис.3. Места установки датчиков на спускаемом аппарате.

В параграфе 2.3. приводится подробное описание метеокомплекса, установленного на аэростатном зонде. Рассмотрены его основные характеристики и режимы работ. Важное место уделяется проблеме размещения датчиков на аэростатном зонде, репрезентативности измерений метеорологических параметров. На рис.4. показаны общий вид метеокомплекса аэростатного зонда и схемы расположения датчиков.

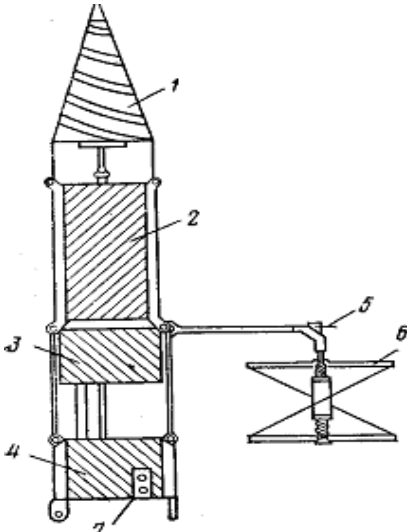


Рис. 4. Гондола с метеокомплексом аэростатного зонда: 1- антенна, 2-передатчик, 3-метеоблок, датчик давления и освещенности, 4-батарея, 5-датчик температуры, 6-датчик вертикальной скорости ветра, 7-нефелометр.

В обоих параграфах (2.2 и 2.3) рассмотрены круг проблем, обеспечивающих высокоточные измерения температуры и давления, и методы их решения. Значительная часть уделена вопросам конструкции чувствительных элементов и окружающим условиям работы во время проведения реального эксперимента.

Калибровке датчиков посвящена **глава 3**, где кратко рассмотрены работы по предполетным калибровкам и их результаты. Представлены таблицы с величинами всех видов погрешностей измерения по каждому датчику и графики калибровок.

Глава 4 - важная по содержанию. В ней приведены обработанные результаты измерений, проведенных в атмосфере Венеры во время миссии "Вега", и их анализ. Результаты получены с метеокомплексов спускаемого аппарата и аэростатных зондов. На двух идентичных космических аппаратах миссии "Вега" предполагалось разместить четыре метеокомплекса. Но один из них был поврежден во время сборки космического аппарата на земле и не был заменен из-за нехватки времени; оставшиеся три отработали практически без замечаний.

В параграфе 4.1. представлены результаты, полученные по измерениям метеокомплекса на спускаемом аппарате. Впервые с момента продолжительных исследований планеты Венеры российскими и американскими аппаратами были получены полные профили температуры и давления с высокой точностью, давшие важные и интересные результаты. На рис.5 представлены профили температуры и давления. На основе этих данных были рассчитаны зависимости $T(H)$, $P(H)$, $\rho(H)$, исходя из уравнения гидростатического равновесия в атмосфере:

$$\frac{dT}{dz} = -\rho g \frac{dT}{dP}.$$

По этим данным температура у поверхности равна $733 \pm 1 \text{ K}$, давление - $89,3 \pm 1,0$ бар. При использовании нулевого опорного уровня $P_0 = 92,1$ бар ($R_0 = 6052$ км), согласно принятой международной модели атмосферы Венеры VIRA (Seiff A. Et al., 1984), получена высота точки посадки 500 м. Надо отметить, что за исключением нижнего и верхнего участка, в среднем профиль согласуется с данными, полученными посадочными аппаратами "Венера" и зондами "Пионер-Венера". Обнаружена сильная температурная инверсия на высотах 62...64 км (рис. 6). В вертикальном профиле температуры четко прослеживаются несколько слоев с различной статической стабильностью.

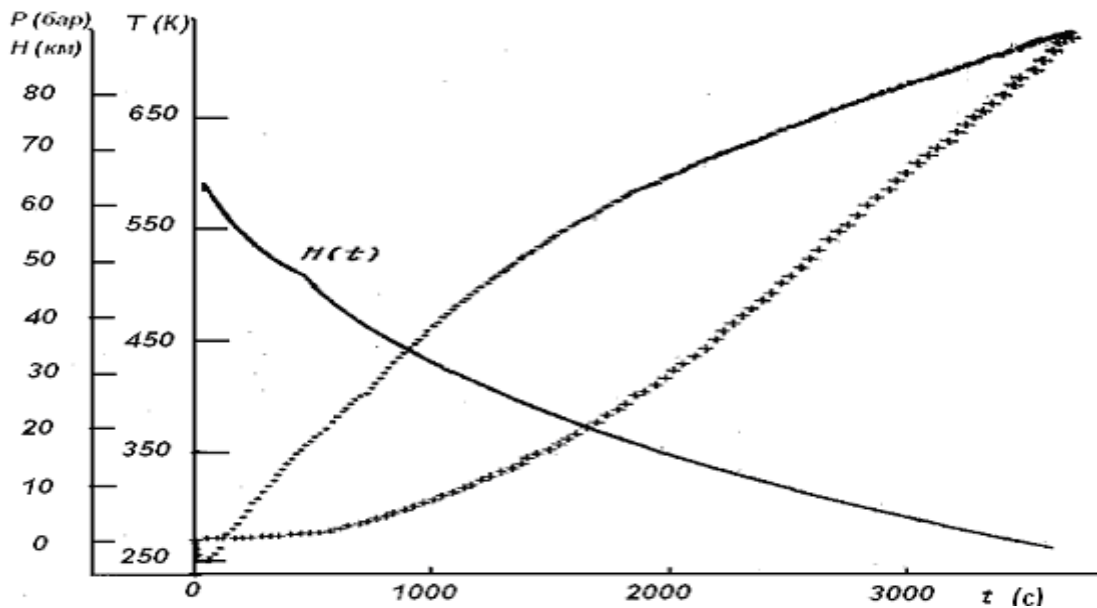


Рис. 5. Результаты измерений температуры (точки) и давления (крестики). Время отсчитывается от момента T_3 (см. табл.2). Сплошная линия - изменение высоты аппарата в зависимости от времени.

Близкое к адиабатическому изменение температуры (нейтральная стратификация) наблюдается в диапазоне высот от 45 до 56 км и впервые - в слое до 8 км. На этих высотах возможна термическая конвекция. В остальных областях градиент температуры меньше адиабатического и стратификация устойчива. В целом отмечается

хорошее совпадение профилей, однако имеются и различия, особенно заметные для высот ниже 15 км и выше 58 км.

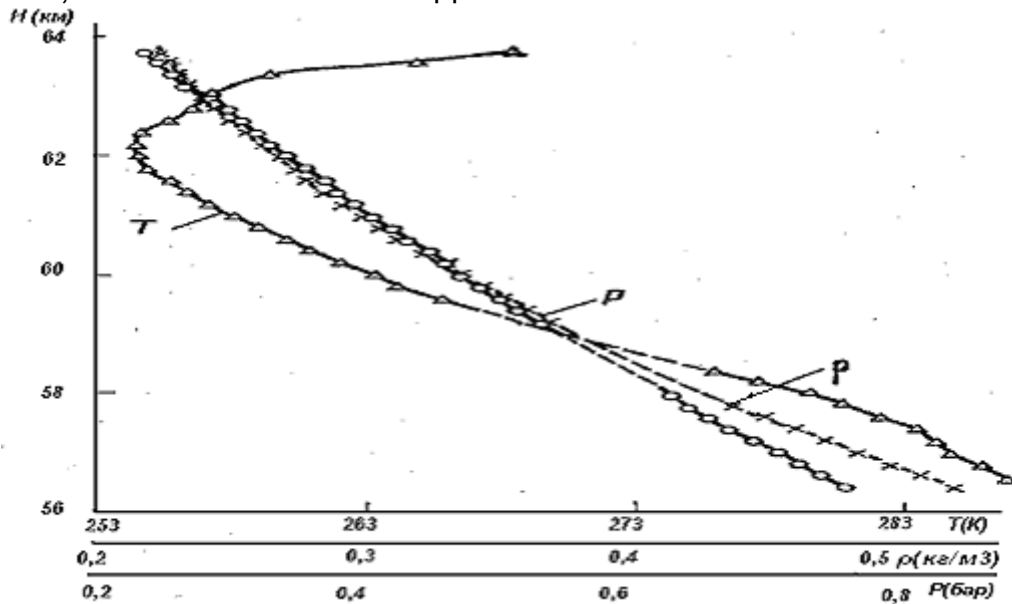


Рис.6. Инверсия температуры в верхней тропосфере. На графике также представлены давление и рассчитанная плотность.

Разность между измеренным температурным профилем и модельным представлена на рис.7.

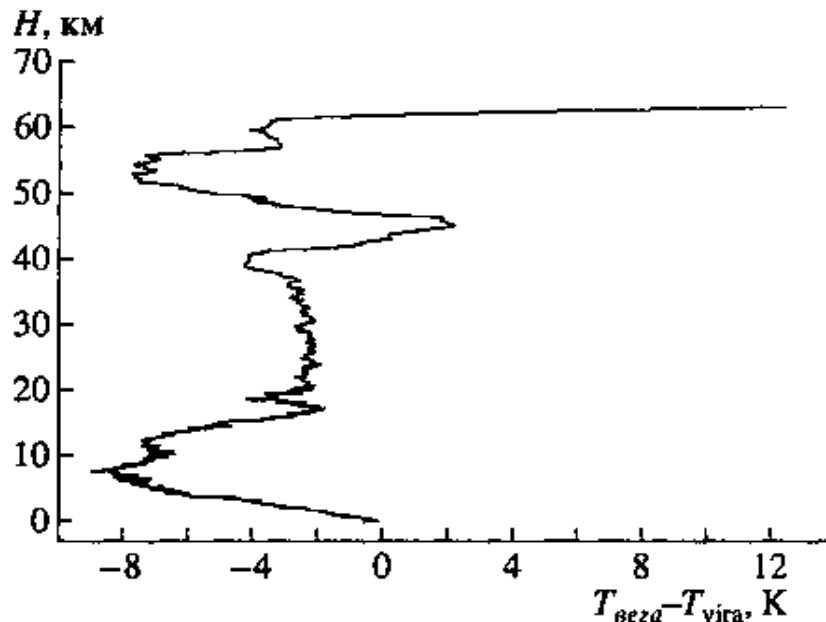


Рис. 7. Кривая зависимости разности температуры, измеренной на "Вега-2", и температурой по модели VIRA.

Измеренная температура систематически ниже, за исключением узкого интервала высот около 45 км и слоя выше 60 км, где

появляется инверсия в температурном профиле по показаниям СА "Вега-2". Наибольшее отличие вертикальных профилей наблюдается на высотах около 8 км, где измеренная "Вегой" температура на 9К ниже, чем модельная, и около 63 км, где она превышает измеренную приблизительно на 13К. Различие между профилями ниже 10 км может быть связано с неточностью данных VIRA, которые основаны на единственном профиле, измеренном "Венерой-10", и экстраполяции профилей, полученных на зондах "Пионер-Венера" (отключившихся на 12 км высоты). Профиль статической стабильности был рассчитан на основе температурного профиля по показаниям СА "Вега-2" с последующим сравнением с VIRA (рис. 8).

Измеренный профиль находится в хорошем согласии с модельным: атмосфера в основном стабильна, за исключением двух интервалов высот: 49...55 км (средний и нижний облачные слои) и слоях между 18...30 км и 1...5 км. Максимум устойчивости, даже более ярко выраженный, чем в профиле VIRA, наблюдается вблизи 15 км.

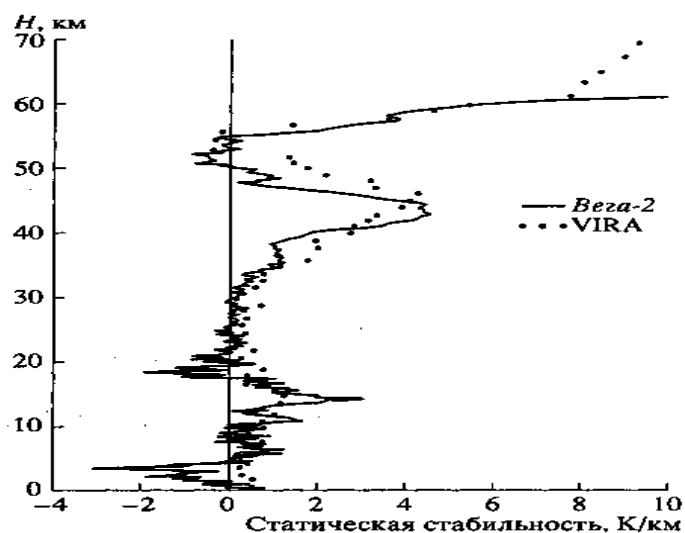
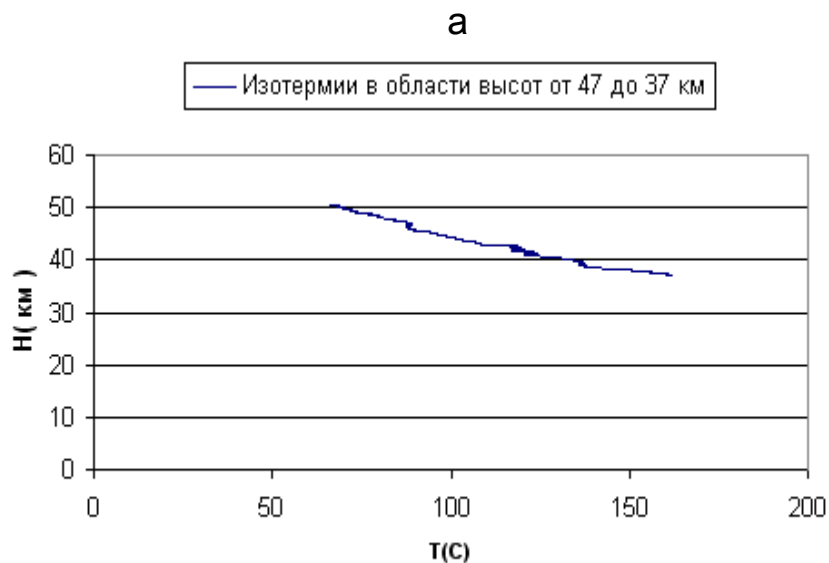


Рис. 8. Зависимости статической стабильности по измеренным данным и по модели VIRA.

По высокоточному дифференциальному каналу, измеряющему пульсации температуры с точностью 0,03К, были обнаружены изотермии в интервале высот от 53 до 37 км, в области нейтральной стратификации, и в нижнем приповерхностном слое. Толщины изотермических слоев в диапазоне высот от 53 до 37 км существенно большие, чем в приповерхностном слое. Особый интерес вызывает

изотермия в самом нижнем (приповерхностном) слое. На рис. 4.9а-д показаны кривые зависимости для высот 53...37 км, а на рис. 4.10а-в - кривые для нижнего слоя (от 0,7 км до поверхности).

Для диапазона высот от 53 до 37 км толщина каждого изотермического слоя составляет несколько сот метров (или соответственно 2·250; 1100; 400 и 1600; 750 м). По всей видимости, природа этих слоев связана с фазовым переходом и образованием жидкой или твердой формы аэрозоля в слоистых облаках. Проведенные эксперименты в проекте “Вега”, по изучению аэрозольной составляющей в атмосфере Венеры, подтверждают эти предположения. Данные экспериментов выявили в атмосфере несколько слоев с высокой концентрацией аэрозоля в областях, где присутствуют изотермические слои. Это связано с сильной слоистостью подоблачного слоя в данном диапазоне высот. В нижнем (километровом) слое атмосферы изотермии узкие - в несколько десятков метров.



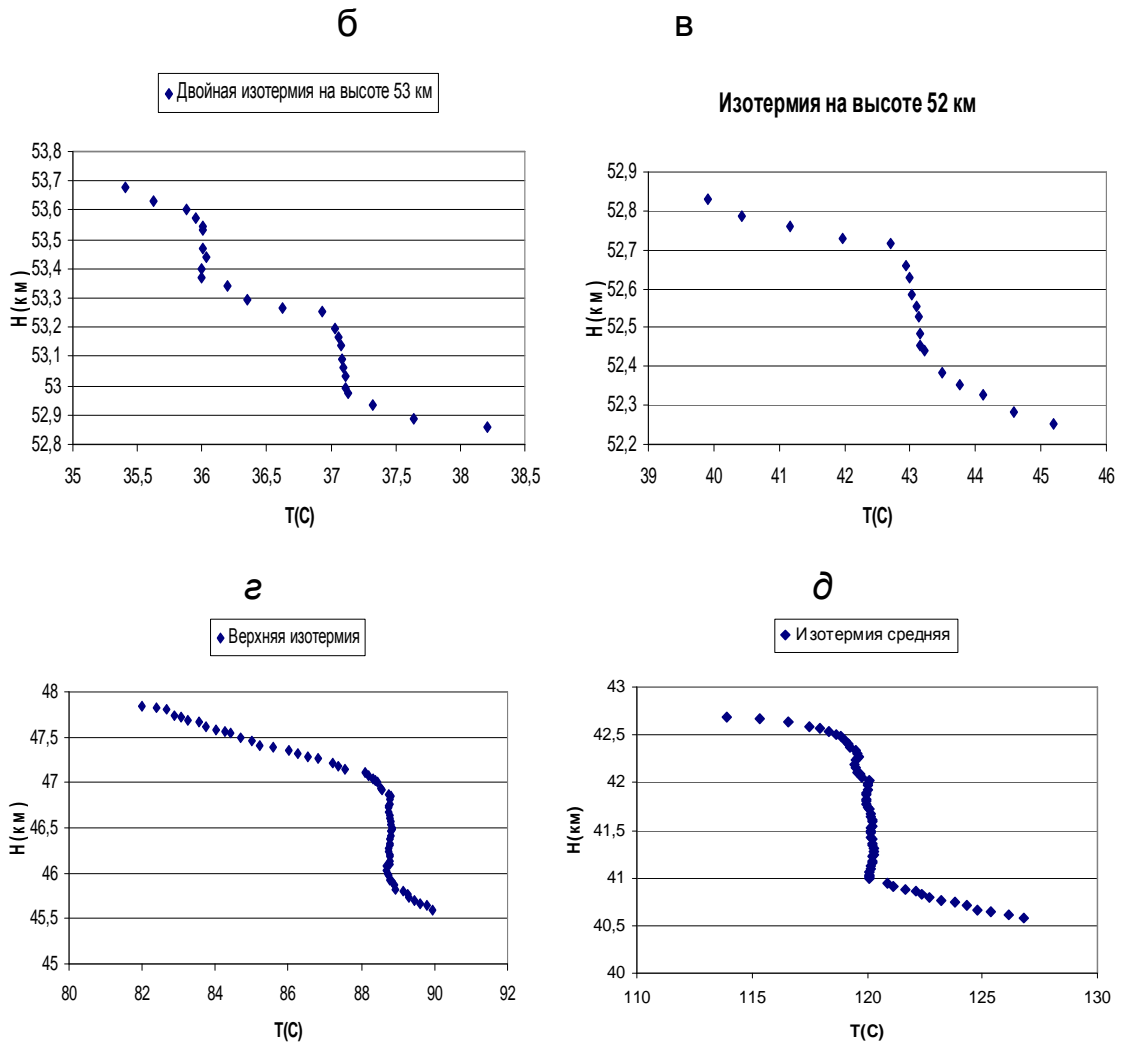
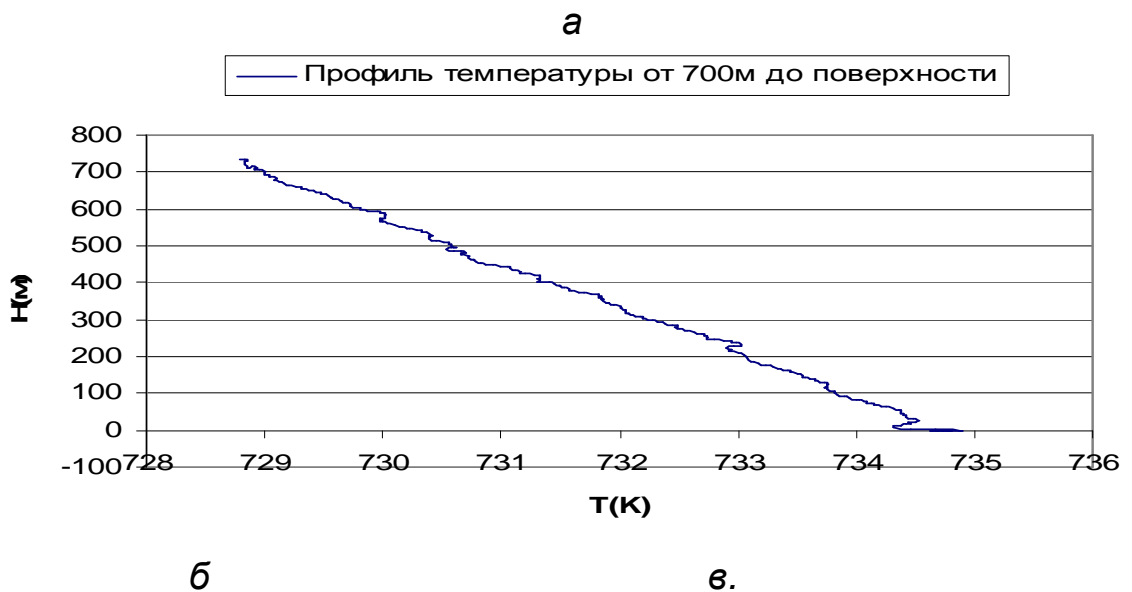


Рис.4.9. Температурные профили ($T^{\circ}C$) в диапазоне высот от 53 до 37 км.



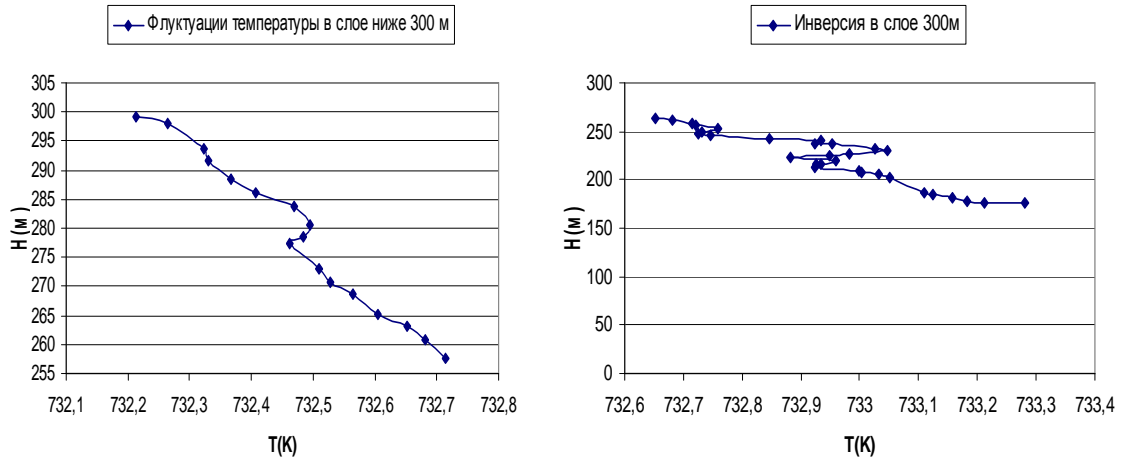


Рис. 4.10. Температурные профили $T(K)$ в диапазоне высот от 700 м до поверхности.

Особый интерес вызывает приповерхностная изотермия, которая имеет толщину около шестидесяти метров и начинается от самой поверхности, как показано на рис. 11. Для земных условий это - редкое явление. Возможно, что появление этой изотермии связано также с фазовым переходом, как и изотермии на больших высотах, но, к сожалению, данных по аэрозолю в приповерхностном слое отсутствуют. Поэтому нет однозначного ответа на этот вопрос.

В самом нижнем (двухметровом) слое (см. рис.11) имеется резкий скачок температуры, который составляет величину $0,3K$. Измерения показывают, что реальная температура поверхности выше температуры изотермического приповерхностного слоя от 60 до 2 м на $0,3..0,7K$.

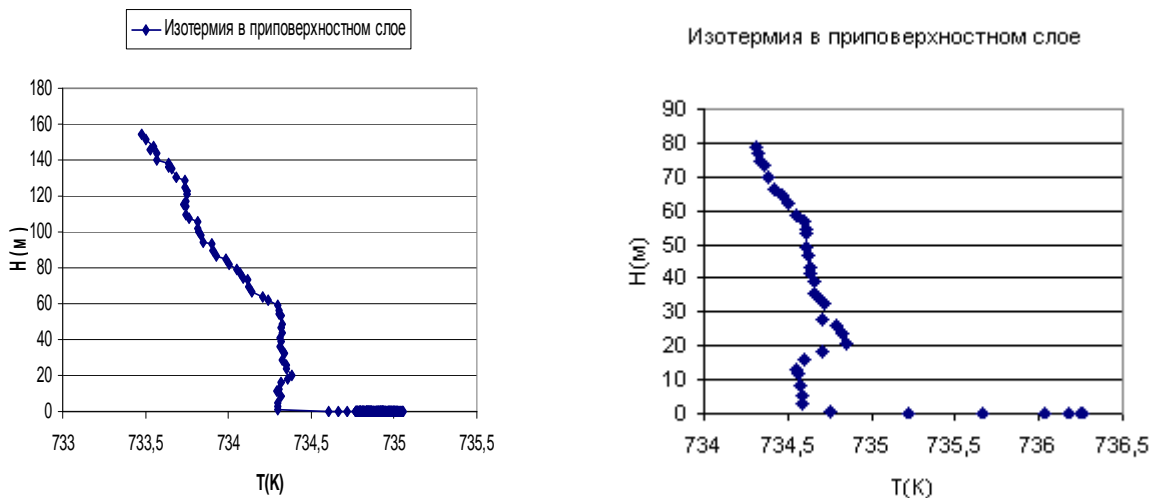


Рис. 11. Температурный профиль в диапазоне от 100 м до поверхности.

В параграфе 4.2 представлены результаты, полученные на аэростатных зондах. Аэростаты впервые дали возможность прямого наблюдения за движением воздушных масс в атмосфере Венеры в течение 46 ч. Полет аэростатов проходил в основном на высоте 53...54 км. Высота полета была выбрана внутри конвективной зоны, где более отчетливо может проявляться действие механизмов, поддерживающих быстрое вращение атмосферы (суперротацию). После ввода аэростаты перемещались потоком на запад. Полет аэростатов не проходил на равновесной высоте, время от времени они совершали вертикальные перемещения на несколько километров вниз под действием значительных вертикальных нисходящих потоков.

На рис. 12 и 13 представлены зависимости от времени параметров окружающей среды, измерявшихся на борту гондолы в течение всего полета каждого аэростатного зонда.

Как видно из сравнения кривых "а" и "б" на рис. 12 и 13, вариации давления и температуры сильно коррелированы. Это говорит о том, что они обусловлены перемещением аэростатных зондов по высоте, а также что измерения температуры не искажены из-за присутствия приборной гондолы и аэростатной оболочки.

Амплитуда вертикальных движений и их скорость оказались значительно больше, чем ожидалось. За время своей работы аэростатная станция "Веги-1" много раз совершала большие вертикальные движения, наибольшее отклонение от равновесной высоты произошло в течение первых часов ее полета. Полет аэростатной станции "Веги-2" проходил очень спокойно в первые 20 ч, с амплитудой вертикальных движений порядка 100 м. Только через 20 ч полет станции "Веги-2" становится похожим на движение аэростатной станции "Веги-1".

Измерения термической структуры, полученные аэростатными зондами аппаратов "Вега", показывают, что атмосфера, в общем, близка к адиабатической, но в ней имеются отдельные воздушные массы, слегка различающиеся по потенциальной температуре и энтропии.

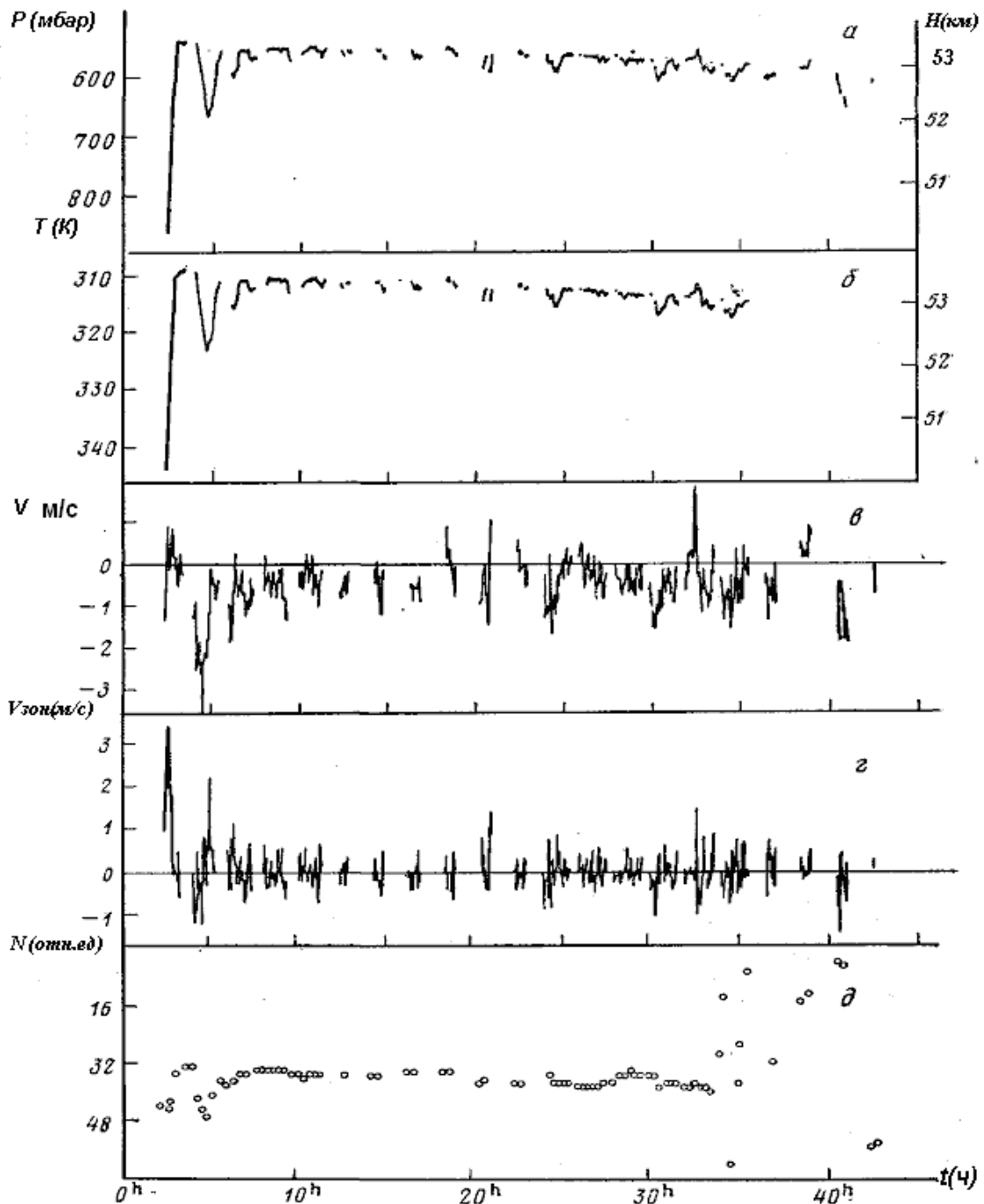


Рис. 12. Метеорологические измерения "Веги-1": а - давление; б - температура; в - вертикальная скорость ветра; г - вертикальная скорость аэростатного зонда; д - отсчеты датчика освещенности. Время отсчитывается от 0^h 11 июня 1985 г. (UT)

Температуры, измеренные "Вегой-1", на 6,5K превышают температуры, измеренные при том же давлении "Вегой-2".

В связи с тем, что точки ввода аэростатных зондов приблизительно симметричны относительно экватора (7°3 с. ш. и 6°6 ю. ш.) различие двух $P(T)$ -множеств представляется удивительным. Разность температур между данными "Веги-1" и "Веги-2" может быть вызвана возмущениями синоптического или планетарного масштаба.

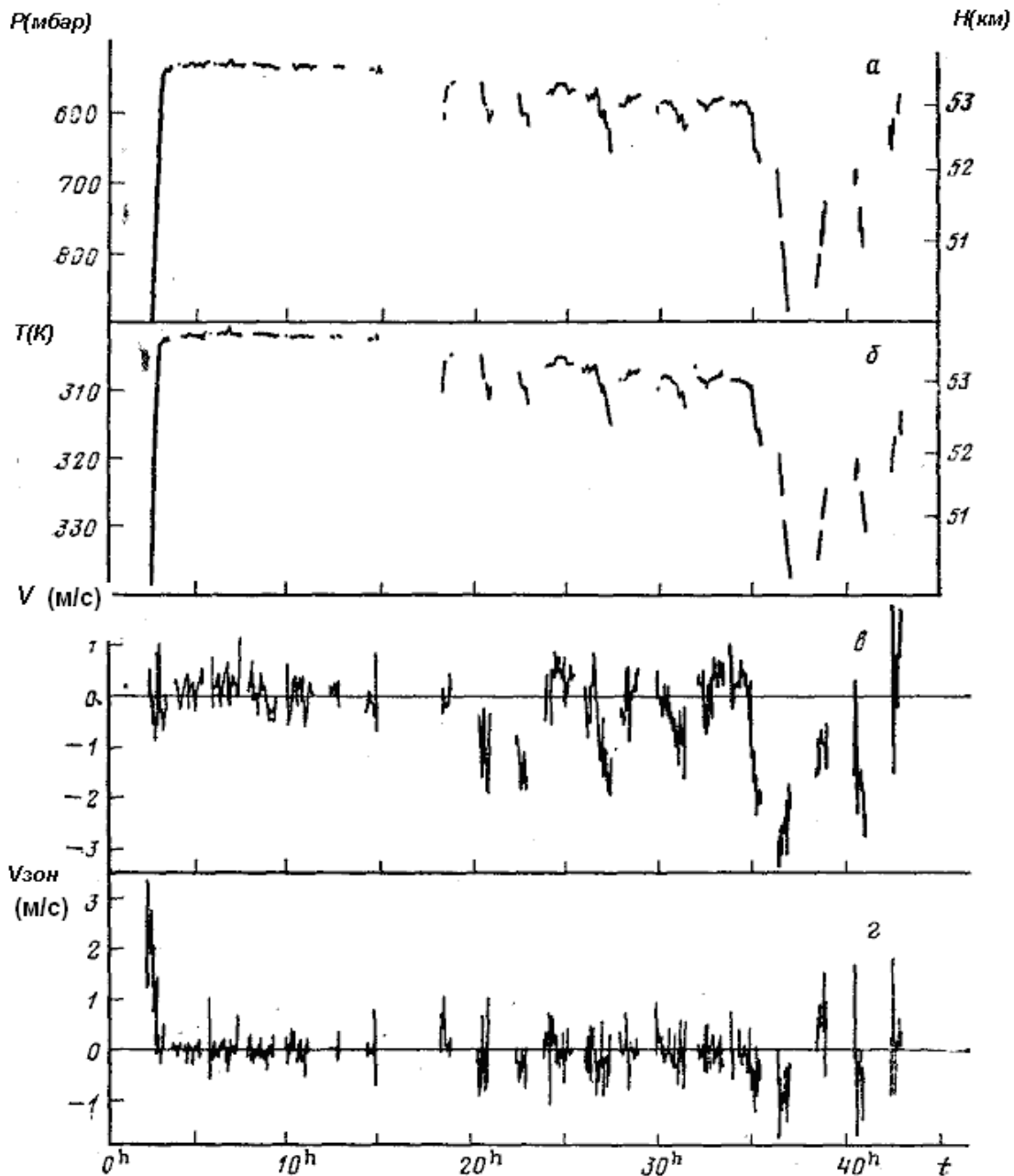


Рис. 13. Метеорологические измерения "Веги-2". Обозначения те же, что на рис. 12. Время отсчитывается от 0^h 15 июня 1985 г. (UT)

Район полета представляет важную часть среднего облачного слоя (Marov M.Ya., Lystsev V.E., Lebedev V.N. et al., 1980; Ragent B., Blamont J., 1980). Как указывалось ранее (Seiff A., D. Kirk, R. Young et al., 1980), температурная стратификация в нем нестабильна и, предположительно, существует конвекция, что и было зафиксировано аэростатами. Множество $P(T)$ -данных, полученных каждым из аэростатных зондов (см. рис.14), показывает практически адиабатическую корреляцию температуры и давления.

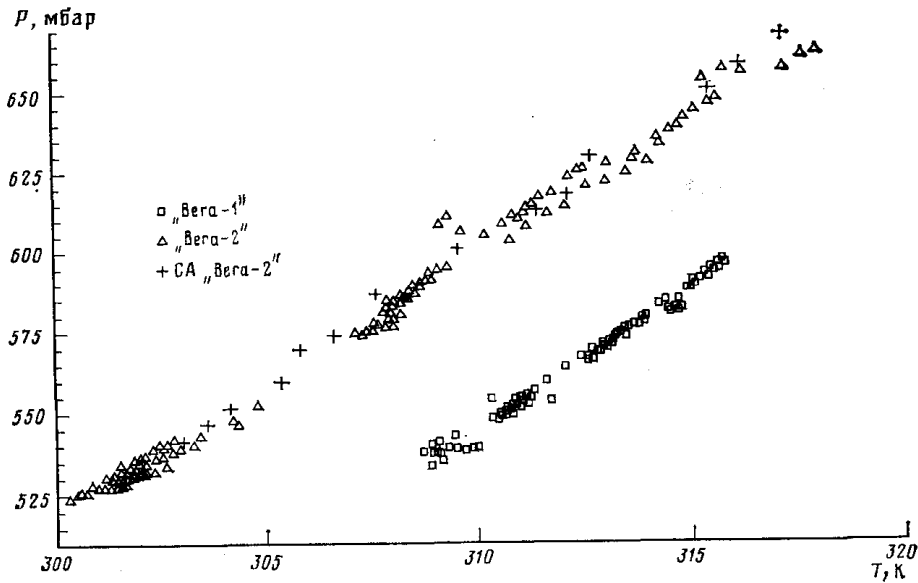


Рис. 14. Результаты измерения температуры и давления на аэростатных зондах "Вега-1" и "Вега-2"

Измеренные на аэростатах типичные значения вертикальной скорости ветра составляют (1...2) м/с и объясняются, вероятно, термической конвекцией. Доплеровские данные указывают на большие скорости ветра по сравнению с предыдущими экспериментами и на возможное наличие связанного с Солнцем возмущения. На движение аэростата "Вега-2", вероятно, оказывал влияние рельеф поверхности. Одной отличительной особенностью в имеющихся данных является большая величина вертикальной скорости ветра w , наблюдавшаяся как на дневной, так и на ночной стороне планеты. Типичные величины w превышают 0,5 м/с, а максимальные значения достигают 4...5 м/с. Максимальные амплитуды могут быть меньше приведенных в работах (Sagdeev, R.Z.; Linkin, V.M.; Blamont, J. et al., 1986), средние же значения амплитуд не изменяются. Среднее значение w в общем согласуется с оценками конвективных движений по теории пути смешения (Cox and Gjuly, 1968) и составляет величину:

$$w < \left(\frac{Fgl}{4\rho c_p T} \right)^{1/2} \approx 2 \text{ м/с} .$$

По теории пути смешения можно оценить также величину флуктуации температуры, которые соответствуют вертикальному ветру со скоростью 2 м/с:

$$\Delta T = 8E \frac{|\omega|^2}{n\delta} \approx 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ К} .$$

В отдельных телеметрических сеансах (каждый охватывает 30-мин интервал измерений) флуктуации температуры имеют амплитуду как раз такого порядка (0,1K); в других же величина ΔT достигает 0,5..0,7K.

В общей структуре среднего облачного слоя, где проводились измерения, не обнаружено каких-либо районов сильного прояснения, хотя отмечены и измерены вариации плотности больших временных масштабов вдоль трассы полета, коррелированные с нисходящими потоками и увеличением температуры.

Во время полета измерялась тонкая структура облачного слоя, представляющая вариации порядка 20% от среднего уровня, в общем, эти вариации антикоррелированы с окружающей температурой. Отсутствие больших вариаций плотности среднего облачного слоя было отмечено ранее по данным предыдущих венерианских зондов (Knollenberg R., et al., 1980), и это согласуется с интенсивным конвективным и зональным движением и с большим временем жизни частиц облачного слоя по данным предыдущих экспериментов.

Зарегистрированное уменьшение обратного рассеяния частицами облачного слоя на больших временных масштабах может быть вызвано опусканием аэростатного зонда в менее плотную зону облачного слоя, как видно, например, из сравнения с данными измерений структуры облаков, проведенных ранее венерианскими зондами. Это хорошо согласуется и с информацией спускаемого аппарата о том, что нижние облачные слои имеют перистую или слоистую структуру, где зарождаются облака, переносимые восходящими потоками в верхнюю зону атмосферы.

В главе 5 кратко приведены результаты миссий “Венера-15,16” и примеры дальнейшего использования метеокомплексов, малых автономных зондов и его элементов в последующих миссиях. Представлено краткое описание новых приборов, включенных в метеокомплекс.

Миссия “Венера-15,16” предшествовала миссии “Вега”, на КА которой устанавливался прибор “Фурье-спектрометр”. Прибор обеспечивал получение спектров в инфракрасной области средней атмосферы Венеры для высот от 55 до 100 км вдоль трассы пролета космического аппарата над планетой. Фурье-спектрометр имел спектральный диапазон 6...40 мкм при спектральном разрешении 4,5...6,5 см⁻¹. (Moroz et al., 1986; Oertel et al., 1987). Прибор показал свою хорошую эффективность для исследования ее термической структуры, термического ветра, вертикальных профилей аэрозоля и малых составляющих в средней атмосфере Венеры дистанционным методом. На основе полученных данных “Венеры-15,16” была построена модель средней атмосферы, зависящая от местного

времени. Миссия “Вега” была последней в исследовании Венеры. За ней шли проекты по исследованию Марса и его спутника (“Фобос”, “Марс-96”, Mars-Surveyor-Program-98, Met-Net). В свете этого изменились требования, предъявляемые к измеряемым параметрам. Но цели остались прежние. В новых миссиях были проведены работы по улучшению характеристик как приборов, так и малых автономных зондов в целом. Улучшения велись в основном, в направлении увеличения научной отдачи:

- расширения количества измеряемых параметров;
- повышения точностных характеристик измерения параметров;
- повышения информативности приборов;
- улучшения методики измерения;
- снижения массы, потребления и габаритов;
- обеспечения автономности.

Для исследования Фобоса была создана долгоживущая автономная станция, которая включала часть элементов метеокомплекса и ряд новых приборов для исследования внутренней структуры спутника и его химического состава. В миссии “Марс-96” разработан спускаемый зонд (малая автономная станция), на которой устанавливались модернизированный метеокомплекс и приборы для исследования внутренней структуры и химического состава планеты. Для международного проекта НАСА Mars-Surveyor-Program-98 разработан малый метеокомплекс из-за ограничений, установленных американской стороной. В рамках международного соглашения между ИКИ и ФМИ (Финский метеорологический институт) ведется работа по созданию глобальной сети малых автономных станций на поверхности Марса (миссия Met-Net). На сегодняшний день с учетом предыдущего задела в миссии “Марс-96” разработана новая малая автономная станция с более широким спектром научных задач.

В этих проектах удалось существенно расширить спектр взаимосвязанных научных задач и их информативность, а также улучшить габаритно-массовые и энергетические характеристики малых автономных зондов. К сожалению, все марсианские миссии после “Веги”, оказались неудачными по причине отказов космических аппаратов, никакой научной информации по малым зондам не было получено. Тем не менее - выполненные разработки показывают широкие возможности применения малых зондов в дальнейших миссиях по исследованию Венеры и Марса, а также имеется возможность применения их на Земле в труднодоступных для человека местах.

Основные результаты диссертационной работы приведены в **Заключении**.

Созданы научные комплексы (в частности метеокомплексы), обеспечивающие измерение параметров атмосфер планет по широкому профилю (температуры, давления, вертикальной и зональной скорости ветра, концентрации аэрозоля и др. параметров) контактными и дистанционными методами. Часть данных, касающихся атмосферы Венеры, были получены впервые (см. раздел “Новизна работы”). В частности, получены профиль температуры в нижней атмосфере с точностью не хуже 1 К, долготный разрез по основным параметрам атмосферы (температуре, давлению, вертикальной и горизонтальной скорости ветра, флуктуациям плотности аэрозоля и излучения поверхности).

На примере проекта “Вега” показана перспективность применения в исследовании атмосфер планет аэростатных зондов как эффективного и оригинального инструмента. Проведение натурных экспериментов показали эффективность созданных приборных комплексов. В течение последних 25 лет, по сути, создано направление в области исследования планет с помощью малых автономных зондов для решения ограниченного круга взаимосвязанных задач. Создание таких автономных зондов позволяет охватить широкий класс научных и прикладных задач в одной миссии.

Отсутствие данных о марсианской атмосфере связано с неудачами всех последних марсианских миссий в СССР и России. Тем не менее, актуальность проделанной работы по марсианским зондам не снижается в связи с продолжением исследования Марса в будущих миссиях. В планах российского космического агентства развиваются миссии по исследованию Венеры и Марса (“Венера –Д”, “Фобос-Грунт”, Met-net). Планируется создать сеть малых станций на поверхности Марса и использовать аэростаты для исследования атмосферы Венеры, что позволит применить ранее сделанный задел.

Тем не менее, все полученные данные актуальны до настоящего времени. Проведенная работа дала ценную научную информацию как для понимания динамики атмосферы Венеры, так и для уточнения многих ее параметров. Работа и ее результаты носили во многом пионерский характер в исследовании Венеры и Марса, оставаясь актуальными для дальнейшего практического применения.

В приложении кратко изложены результаты информационно-патентного поиска датчиков температуры и давления, выпускаемых промышленностью.

Публикации по теме диссертации

1. Harri A.-M., Siili T., Linkin V., **Lipatov A.**, Nenarokov D. The Mars 96 Small Station.//In: Meteopackage and Its Observations American Astronomical Society DPS meeting. 1996. V.28. P.1068.
2. Harri A.-M., Linkin V., Polkko J., Marov M., Pommereau J.-P., **Lipatov A.**, Siili T., Manuilov K., Lebedey V. et al. Meteorological observations on Martian surface : met-packages of Mars-96 Small Stations and Penetrators. //Planetary and Space Science. 1998. V. 46. P.779-793.
3. Kremnev R. S., Selivanov A.S., Linkin V. M., Blamont J., Bakitko R.V., **Lipatov A. N.**, Tarnoruder I.Y., Puchkov V.I., Kustodiev V.D. et al. VEGA Balloon as a Tool to Study the Dynamics of the Venus Atmosphere.// PAZH. 1986. V.12. N1. P.19.
4. Kremnev R.S., Linkin V.M., **Lipatov A.N.**, Ragent B., Preston R.A. VEGA balloon system and instrumentation science.// PAZH. Mar. 1986. V.231. P.1408-1411.
5. Kremnev R.S., Selivanov A.S., Linkin V.M., **Lipatov A.N.**, Tarnoruder I.Ia., Puchkov V.I., Kustodiev V.D., Shurupov A.A., Ragent B., Preston R.A. The Vega balloons - A tool for studying atmosphere dynamics on Venus. //PAZH. . Jan. 1986. V.12. P.19-24.
6. Linkin V.M., Blamont J., **Lipatov A.N.**, Shurupov A.A., Malique C., Ignatova S.P., Frank G.A., Khlyustova L.I. et al. Thermal structure in the Venus middle cloud layer. // PAZH. Jan. 1986. V.12. P.36-40.
7. Linkin V.M., Blamont J., **Lipatov A.N.**, Devyatkin S.I., Dyachkov A.V., Ignatova S.P., Kerzhanovich V.V., Malique C., Stadnyk B.I., Sanotskii Y.V., Stolarchuk P.G., Terterashvili A.V., Shurupov A.A., Khlyustova L.I. Vertical thermal structure in the Venus atmosphere from provisional VEGA 2 temperature and pressure data. // PAZH. Feb. 1986. V.12. P.100-105.
8. Linkin V.M., Blamont J.E., **Lipatov A.N.**, Shurupov A.A., Malique C., Ignatova S.P., Frank G.A., Khlyustova L.I. et al. Thermal Structure in the Venus Middle Cloud Layer.// PAZH. Jan. 1986. V.12. N1. P.15.
9. Linkin V.M., Blamont J.E., **Lipatov A.N.**, Devyatkin S.I., Dyachkov A.V., Ignatova S.P., Kerzhanovich V.V., Khlyustova L.I., Malique C., Sanotskii Y.V., Shurupov A.A., Stadnyk B.I., Stolyarchuk P.G., Terterashvili A.V. Vertical Thermal Structure in the Venus Atmosphere from Provisional VEGA-2 Temperature and Pressure Data.// PAZH. Jan. 1986. V.12. N1. P.40.
10. Linkin V.M., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.**, Pichkadze K.M., Shurupov A.A., Terterashvili A.V., Ingersoll A.P. et al. VEGA balloon dynamics and vertical winds in the Venus middle cloud region.// Science. 1986. V. 231. P.1417-1419.
11. Linkin V.M., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.**, Shurupov A.A., Seiff A., Ragent B., Young R.E., Ingersoll A.P., Crisp D., Elson L.S., Preston R.A., Blamont J.E. Thermal structure of the Venus atmosphere in the middle cloud layer.// Science. 1986. V.231. P.1420-1422.

12. Linkin V.M., Blamon Z., **Lipatov A.P.**, Devyatkin S.I., Dyachkov A.V., Ignatova S.I., Kerzhanovich V.V., Malyk K., Stadny V.I., Sanotskiy Y.V. Vertical thermal structure of the Venus atmosphere from temperature and pressure measurements.// PAZH. 1986. V. 12. N2. P.100-105.

13. Linkin V.M., Blamont G., Devyatkin S.I., Ignatova S.P., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.**, Malik K., Stadnyk B.I., Sanotskiy Ya.V., Stolyarchuk P.G. Thermal structure of Venusian Atmosphere determined from results of measurements from Vega-2 landing module.// Science and Technology. 1987. V. 25. N 5. P.659-672.

14. Linkin V., **Lipatov A.**, Makarov V., Khlostova L., Ekonomov A., Kremnev R., Martinov B., Harri A.-M. et al. The Mars 96 Small Station. //In: Implementation and Scientific Objectives American Astronomical Society DPS meeting. 1996. V.28. P.1068.

15. Linkin V., Harri A.-M., **Lipatov A.**, Belostotskaja K., Derbunovich B., Ekonomov A., Khlostova L., Kremnev R. et al. A sophisticated lander for scientific exploration of Mars: scientific objectives and implementation of the Mars-96 Small Station.// Planetary and Space Science. 1998. V. 46. P.717-737.

16. Sagdeev R.Z., Linkin V.M., **Lipatov A.N.**, Pichkadze K.M., Shurupov A.A., Terterashvili A.V., Bakitko R.V., Blamont J.E., Malique C., Ragent B., Preston R.A., Elson L.S., Crisp D. The VEGA Venus Balloon Experiment. //Science. 1986. V.231. P.1408.

17. Sagdeev R.Z., Linkin V.M., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.**, Shurupov A.A., Blamont J.E., Crisp D. et al. Overview of VEGA Venus balloon in situ meteorological measurements. //Science. 1986. V. 231. P.1411-1414.

18. Sagdeev R.Z., Linkin N. M., Blamont J., Preston R., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.**, Shurupov A.A., Ingersoll A., Crisp D. et al. Meteorological data along the VEGA1,2 float paths. // PAZH. Jan. 1986. V.12. P.30-35.

19. Sagdeev R.Z., Linkin V.M., Blamont J.E., Preston R.A., Kerzhanovich V.V., **Lipatov A.N.** et al. Meteorological Data Along the VEGA-1 and VEGA-2 Float Paths.// PAZH. Jan. 1986. V.12. N1. P.12.

20. Young R.E., Walterscheid R.L., Schubert G., Seiff A., Linkin V.M., **Lipatov A.N.** Characteristics of gravity waves generated by surface topography on Venus - Comparison with the VEGA Balloon results Journal of the Atmospheric.// Sciences. 1987. V. 44. P. 2628-2639.

Список цитируемой литературы

1. Авдуевский В.С., Годнев А.Г., Семенченко А.В. и др. Исследование характеристик стратосферы Венеры по измерениям перегрузок при торможении станций "Венера-13" и "Венера-14". // Космич. исслед. 1983. Т. 21. С. 205.
2. Авдуевский В.С., Бородин Н.Ф., Васильев В.Н. и др. Анализ результатов измерения параметров атмосферы Венеры в местах посадки АМС "Венера-11" и "Венера-12". // Космич. исслед. 1979. Т. 17. С. 655-660.
3. Андреев Р. А., Алтунин В. И., Арманд Н. А. и др. // Письма в Астрон. журн. 1986. Т.12. №1.
4. Кержанович В. В. и Маров М. Я. // In: Venus/Eds. Hunten D. M., Colin L., Donahue T., Moroz V. I., Univ. of Arizona Press. 1983. P. 766.
5. Мороз В.И., Хантрес Б.Т., Шевалев И.Л. Планетные экспедиции XX века. // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 5. С. 451-481.
6. Черемухина З.П., Морозов С.Ф., Бородин Н.Ф. Оценка температуры стратосферы Венеры по данным о перегрузках автоматической станции "Венера-8". // Космич. исслед. 1974. Т. 12. № 2. С. 264.
7. Эртель Д., Мороз В.И., Линкин В.М. и др. "Венера-15", "Венера-16": первые результаты эксперимента по инфракрасной спектроскопии. // ПАЖ. 1984. Т. 10. № 2. С. 101.
8. Эртель Д., Мороз В.И., Нопираковский И. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС "Венера-15" и "Венера-16". Методика и первые результаты. // Космич. исслед. 1985. Т. 23. С. 191.
9. Avduevskiy V.S., Marov M.Ya., Kulikov Yu.N., Shari V.P., Gorbachevskiy A.Ya., Uspenskiy G.R., and Cheremukhina Z.P. Structure and parameters of the Venus atmosphere according to Venera probe data. // In: Venus/Eds. D. M. Hunten, L. Collin, T. M. Donahue, and V. I. Moroz. 1983. P. 681-765.
10. Belton M. J. S., Gierasch P. J., Smith M. D., Helfenstein P., Schinder P. J., Pollack J. B., Rages K., Morrison D., Klaasen K. P., and Pilcher C. B.; Images from Galileo of the Venus cloud deck. // Science. 1991. V.253. P.1531-1536.
11. Boyer C., and Guerin P. Étude de la Rotation Rétrograde, en 4 Jours, de la Couche Extérieure Nuageuse de Vénus. // Icarus. 1969. V.11. P.338-355.
12. Clancy R. T., Sandor B. J. and Moriarty-Schieven C. H.. Dynamics of the Venus Upper Atmosphere: Global-Temporal Distribution of Winds, Temperature, and CO at the Venus Mesopause. // Bull. of the Am.Astron.Soc. 2007. V.39. abstract 61.07.
13. Cox and Guly. Principles of stellar structure. // Gordon and Breach, 1968. V. 1.
14. Counselman C. C., Gurevitch S. A., King R. W., et al. // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P.8026.

15. Esposito L.W., Bertaux J.- L., Krasnopolsky V., Moroz V.I., and Zasova L.W. Chemistry of lower atmosphere and clouds // In: Venus II/Eds. Bougher S.W., Hunten D.M., Phillips R.J., P. Tucon. The University of Arizona Press, 1997. P. 415-458.
16. Fenton F.K., Pearl J.C. and Martin T. Mapping Mariner 9 dust opacity // *Icarus*. 1997. V. 130, P. 115-124.
17. Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S.R., Read P.L., Huot J. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km. // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 24155–24176.
18. Gelman B.G., Zolotukhin V.G., Mukhin L.M. et al. Gas chromatograph analysis of the Venus atmosphere chemical composition on-board the Venera-12 automatic interplanetary station.// *PAZH*. 1979. V.5, №1.
19. Gierasch P.J., Goody R.M., Young R.E., Crisp D., Edwards C., Kahn R., McCleese D., Rider D., Del Genio A., Greeley R., Hou A., Leovy C.B., Newman M. The general circulation of the Venus atmosphere: an assessment. //In: *Venus*. 1997. P.459-500.
20. Hinson D. and Jenkins J. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus. // *Icarus*. 1995. V. 114. P. 310.
21. Huntress W.H., Moroz V.I. and Shevaley I.L. Lunar and planetary robotic and exploration missions in the 20th century. // *Space Sci. Rev.* 2002.
22. Jenkins V.M. et al. Radio occultation of the Venus atmosphere with the Magellan spacecraft. 2. Results from the October 1991 experiment. // *Icarus*. 1994. V. 111. P. 79.
23. Kliore A.J., Moroz V.I. Keating G. The Venus International Reference Atmosphere // *Adv. Space Res.* 1985.№11.
24. Krasnopolsky V.A. Vega mission results and chemical composition of Venusian clouds. // *Icarus*. 1989. V8. P. 202-208.
25. Krasnopolsky V.A. Chemical composition of Venus atmosphere and clouds: Some unsolved problems .// *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1352–1359.
26. Krasnopolsky V.A. Chemical composition of Venus atmosphere and clouds: Some unsolved problems. // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1352–1359.
27. Knollenberg R., Travis L., Tomasko M. et al. // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85. P. 8059.
28. Kliore A.J. and Patel I.R. The vertical structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus orbiter radio occultations. // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P.7957-7962.
29. Kliore A. and Patel U. Thermal structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultations. // *Icarus*. 1982. V. 52. P. 320-334.

30. Kliore A., Moroz V.I., Keating G. Thermal structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultations // *Icarus*. 1982. V.52. P.320-334.
31. Kliore A.J. Recent Results on Venus Atmosphere from Pioneer Venus Radio Occultations. // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. № 9. P. 41-49.
32. Kliore A., Moroz V.I. and Keating G. The Venus International Reference Atmosphere. // *Adv. Space Res.* 1985. № 11.
33. Knollenberg R., Travis L., Tomasko M. et al. The Interaction of solar Wind with Venus. // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 8059.
34. Krasnopolsky V.A. Vega mission results and chemical composition of Venussian clouds. // *Icarus*. 1989. V. 80. P. 202-210.
35. Krasnopolsky V.A. Chemical composition of Venus atmosphere and clouds: Some unsolved problems // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P.1352-1359.
36. Lellouch E., Goldstein J.J., Rosenqvist J. et al. Global circulation, thermal structure and carbon monoxide distribution in Venus' mesosphere in 1991// *Icarus*. 1994. V 110. P.315-339.
37. Leovy C.W. Rotation of the upper atmosphere of Venus // *J. Atmosph. Sci.* 1973. V.30. P.1218-1220.
38. Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: known and unknown. // *Advances in Space Res.* 1989. V.10. №5. P.91-101.
39. Limaye S.S., and Suomi V.E. Cloud motion on Venus: global structure and organization.// *J. Atm. Sci.* 1981. V.38. P.1220-1235.
40. Lewis S.R., Collins M., Read P.L., Forget F., Hourdin F., Fournier F., Hourdin C., Talagrand O., Huot J.-P. A climate database for Mars. // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. № 24. P.177-24, 194.
41. Marov M.Ya., Lystsev V.E., Lebedev V.N.. et al. The structure and microphysics properties of Venus clouds: Venera 9,10,11 data // *Icarus*. 1980. V. 44. P. 608-639.
42. Moroz V.I., Spankuch D., Linkin V.M., Dohler W., Matsygorin I.A., Schafer K., Zasova L.V., Oertel D., Dyachkov A.V., Schuster R., Kerzhanovich V.V., Becker-Ross H., Ustinov E.A. and Stadthaus W. Venus spacecraft infrared radiance spectra. Some aspects of their interpretation. // *Applied Optics*. V 25. 1986. N10.
43. Newman M., Schubert G., Kliore A.J., and Patel I.R. Zonal winds in the middle atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultation data. // *J. Atmosph. Sci.* 1984. V.41. P.1901-1913.
44. Oertel D., Moroz V.I., Spankuch D., Linkin V.M., Jahn H., Kerzhanovich V.V., Becker-Ross H., Matsygorin I.A., Stadthaus K., Lipatov A.N., Nopirakowski J., Shurupov A.A., Dohler W., Zasova L.V., Schafer K., Ustinov E.A., Guldner J., Dubois R., Infrared spectrometry from Venera-15 and Venera-16, // *Adv. Space Res.* 1987. V.5. P. 25.

45. Oertel D., Moroz V.I., Nopirokovskii I., Linkin V.M., Jahn H., Kremnev R.S., Beker-Ross H., Kerzhanovich V.V., Schuster R., Matsigorin I.A., Doler W., Dyachkov A.V., Schafer K., Zasova L.V. et al. Venerea-15 and Venera-16 infrared experiment. 1. Technique and first results. // Veröffentlichungen des Forschungsbereiches Geo-Kosmowissenschaften. 1989. S.18.
46. Pollack J.B., Regent B., Boese B., Tomasko M.G., Blamont J.E., Knollenberg R.G., Esposito L.W., Stewart A.I., Travis L.D. Nature of the ultraviolet absorber in the Venus clouds: Inferences based on Pioneer Venus data. // Science. 1979. V.205. P.76-79.
47. Pollack J.B., Toon O.B., Whitten R.C. et al. Distribution and source of the UV-absorber in Venus atmosphere // J. Geophys. Res. 1980. V.5. A13. P. 8141-8150.
48. Regent B., Blamont J. The Stability of Climate on Venus. // J. Geophys. Res. 1980. V.85. P.8099.
49. Ross-Serote M., Drossart P., Encrenaz Th. et al. The thermal structure and dynamics of the atmosphere of Venus between 70-90 km from the Galileo-NIMS spectra. // Icarus. 1995. V.114. P.300-309.
50. Sagdeev R.Z.; Linkin V.M.; Blamont J. et al. Meteorological data along the VEGA 1, 2 float paths. // Soviet Astronomy Letters (ISSN 0360-0327). Jan.-Feb. 1986. V.12. P.12-15.
51. Seiff A., Kirk D., Young R. et al. Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of Venus // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. A13. P. 7903-7933.
52. Seiff A. Thermal structure of the atmosphere of Venus. // In: Venus /Eds Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M. and Moroz V.I. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983. P. 215-279.
53. Seiff A., Schofield J.T., Kliore A.J. et al. Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 km altitude. // Advances in Space Res. 1985. V5. N11. P.3-58.
54. Schofield J.T., Taylor F.W. Net global thermal emission from the Venus atmosphere. // Icarus. 1982. V. 52. P.245.
55. Schofield J. T. and F. W. Taylor. Measurement of the mean solar fixed temperature and cloud structure of the middle atmosphere of Venus. // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1983. V.109. P.57-80.
56. Schubert G. General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere; // In: Venus (Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M., and Moroz V.I. The Univ. of Arizona Press, Tucson Arizona, 1983. P.681-765.
57. Taylor F. W., Beer R., Chahine M. T., Diner D. J., Elson L. S., Haskins R. D., McCleese D. J., Martonchik J. V. and Reichley P. E. Structure and meteorology of the middle atmosphere of Venus: Infrared remote sensing from the Pioneer orbiter. // J. Geophys. Res. 1980. V.85. P.7963-8006.

58. Taylor F.W., Hunten D.M. and Ksanfomality L.V. The thermal balance of the middle and upper atmosphere of Venus. //In: Venus/Eds Hunten D.M., Colin L., Donahue T.M. and Moroz V.I. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1983. P. 650-680.
59. Toigo, A., Gierasch P. J., Smith M. D. High resolution cloud feature tracking on Venus by Galileo. // *Icarus*. 1994. V.109. P.318-336.
60. Walterscheid R.L., Shubert G., Newman M., and Kliore A.J. Zonal wind and the angular momentum balance of Venus' atmosphere within and above the clouds. // *J. Atmosph. Sci.* 1985. V.42. P.1982-1990.
61. Yakoviev O. L., Gubenko V. N., Matyugov S. S., Yakovleva G. D. and Vaganov L. R. Atmosphere of Venus in South Subpolar Region. // *Kosmich. issled.* 1987. V.25. N25. P.258-266.
62. Yakoviev O.L., Matyugov S.S., Efimov A, Gubenko V.N., Kucheriavenkov A. Atmosphere of Venus in North Polar Region.// *Kosmich. issled.* , 1987.V.25. N25.P. 267-274.
63. Yakoviev O. L., Matyugov S. S. and Gubenko V. N. Venera-15 and 16 Middle Atmosphere Profiles from Radar Occultations: Polar and Near Polar Atmosphere of Venus. // *Icarus*. 1991. V.94. P.493-510.
64. Zasova L.V., Krasnopolsky V.A., Moroz V.I. Vertical distribution of SO₂ in upper cloud layer of Venus and origin of the UV absorption. // *Adv. Space Res.*1981. V.1. P.31.
65. Zasova L.V, Spankuch D., Moroz V.I. et al. Venera-15 and Venera-16 infrared experiment. 3. Some on the cloud structure. // *Veroff. Fo.ber. Geo-Kosmowi.* 1989. V. 18.

055(02)2 Ротапринт ИКИ РАН, 117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 14.11.2008

Заказ 2162 Формат 70x108/32 Тираж 100 экз. 2,0 уч-изд.л.