

В. В. КЕРЖАНОВИЧ, М. Я. МАРОВ

**ЦИРКУЛЯЦИЯ И ЗАПЫЛЕННОСТЬ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ  
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СКОРОСТИ ВЕТРА НА АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
МЕЖПЛАНЕТНОЙ СТАНЦИИ «ВЕНЕРА-8»**

*(Представлено академиком А. П. Виноградовым 1 VIII 1973)*

Во время снижения спускаемого аппарата (СА) автоматической межпланетной станции (АМС) «Венера-8» по доплеровским измерениям скорости в <sup>(1)</sup> были сделаны предварительные оценки скорости ветра в атмосфере Венеры.

В использовавшемся методе непосредственно определялась компонента скорости ветра  $u_{ге}$  в направлении от «подземной» точки к району спуска; азимут этого направления, отсчитываемый от направления на Северный полюс по часовой стрелке, составил около  $-115^\circ$ , т. е. измеряемая компонента была близка к зональной. Измерения скорости СА характеризуются следующими погрешностями: постоянная систематическая менее 0,2 м/сек; медленно меняющаяся от 0 у поверхности до 0,7 м/сек в начале измерений, флюктуационная 0,1 м/сек. Погрешности оценки скорости ветра определяются в основном неточностью в скорости снижения аппарата, вычисляемой по измерениям температуры, давления и высоты и составляют от 0,5 м/сек у поверхности до 7—8 м/сек на высотах около 50 км.

Измеренное высотное распределение скорости ветра показано на рис. 1 а; скорости ветра на высотах 0—12 км показаны на рис. 1, б. Кривая  $a'$  отвечает высотной привязке, сделанной по измеренной температуре с использованием модели атмосферы <sup>(2)</sup>, а кривая  $a''$  — высоте, рассчитанной по измерениям температуры и давления с использованием уравнения гидростатики. Горизонтальные линии соответствуют максимальным погрешностям. Для профиля на рис. 1, б скорость снижения СА получена аппроксимацией измерений радиовысотомера полиномом третьей степени.

Измеренной компоненте могут, в принципе, соответствовать различные величины и направления скорости ветра такие, что их проекция на направление «подземная точка — СА» равняется измеренной компоненте. С этим замечанием мы говорим об измеренной компоненте просто как о скорости ветра, помня, что модуль скорости ветра может быть и больше.

Скорость ветра составила от  $0,5_{-0,75}^{+0,25}$  м/сек у поверхности до 140 м/сек на высотах около 50 км. Общее направление движения на всех высотах остается постоянным и соответствует ветру от утреннего терминатора или от антисолнечной точки на освещенную сторону, т. е. совпадает с направлением собственного вращения Венеры. Нижняя область больших градиентов скорости ветра (12—18 км) лежит существенно ниже границы ( $\approx 32$  км), выше которой заметный вклад в ослабление солнечной радиации вносит аэрозольная составляющая, ассоциируемая с возможным протяженным облачным слоем <sup>(3)</sup>.

Уменьшение измеренной компоненты на высотах 42—50 и 12—18 км может быть связано и с поворотом скорости ветра существенно, однако, что измеренные значения не могут отвечать ветру, направленному в сторону собственного вращения Венеры, как этого следовало бы ожидать из модели «глубокой циркуляции» <sup>(4)</sup> или численного эксперимента <sup>(5)</sup>.

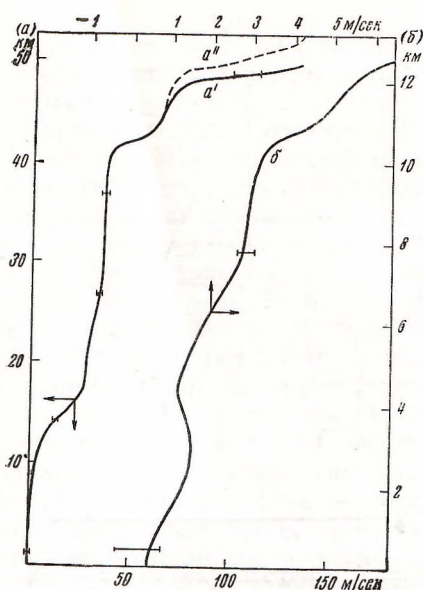


Рис. 1. Высотные распределения скорости ветра по измерениям на АМС «Венера-8»: а — 0—52 км, б — 0—12 км

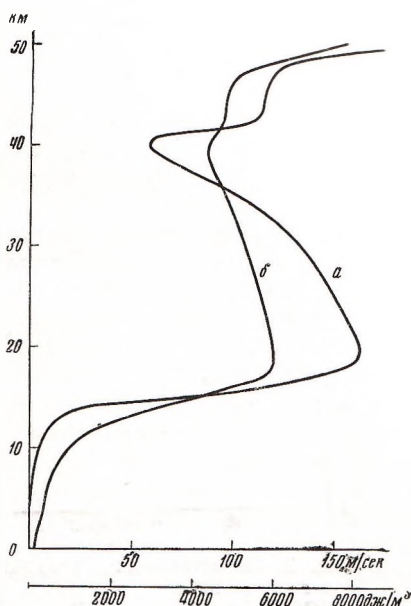


Рис. 2. Кинетическая энергия атмосферы (а) и земной эквивалент скорости ветра (б)

Средняя энергетическая скорость ветра, найденная как

$$\langle u \rangle = \left[ \frac{\int_0^{H_0} \rho(h) u(h) dh}{\int_0^{H_0} \rho(h) dh} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\rho(h)$  и  $u(h)$  — соответственно плотность атмосферы и скорость ветра на высоте  $h$ , составила около 15 м/сек и оказалась близкой к земному значению (17 м/сек, см. (6)). Эта величина значительно превышает существующие оценки; в то же время на высотах 0—10 км, где сосредоточено около половины массы атмосферы, средняя скорость ветра имеет величину порядка 1 м/сек, что совпадает с оценками работы (7). Отношение кинетической энергии к энтальпии столба атмосферы составляет около  $0,5 \cdot 10^{-3}$ , что также близко к земному значению.

На рис. 2 показаны распределение кинетической энергии по высоте и «земной» эквивалент измеренной скорости ветра, величина которого находилась как

$$u_0 = u(h) \cdot \left[ \frac{\rho(h)}{\rho_0} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность воздуха у поверхности Земли. Максимум кинетической энергии в нижней атмосфере достигается на высоте 18—20 км. Измеренная скорость ветра на высотах 20—40 км эквивалентна 90—120 м/сек у поверхности Земли; 0,5 м/сек у поверхности Венеры соответствует 3,5 м/сек земной скорости ветра.

Хотя скорость ветра, измеренная на «Венере-8», превышает данные «Венеры-4» и «Венеры-7» (8) (на «Венере-5 и 6» измерялась только вертикальная компонента), их результаты имеют несколько общих особенностей: увеличение скорости ветра с высотой, постоянство скорости ветра в области высот 20—40 км, малость ветра вблизи поверхности. В действительности различие в данных «Венер-4, 7, 8» может быть и меньше, если принять во внимание систематические погрешности измерений «Венеры-4, 7», а также разброс районов спуска. Для «Венеры-4» необходимо также учесть, что измеренная компонента скорости могла соответствовать не

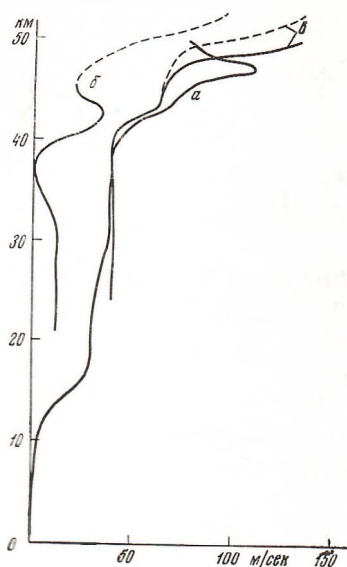


Рис. 3. Сопоставление результатов измерений скорости ветра на АМС «Венера-4» (а), «Венера-7» (б) и «Венера-8» (в)

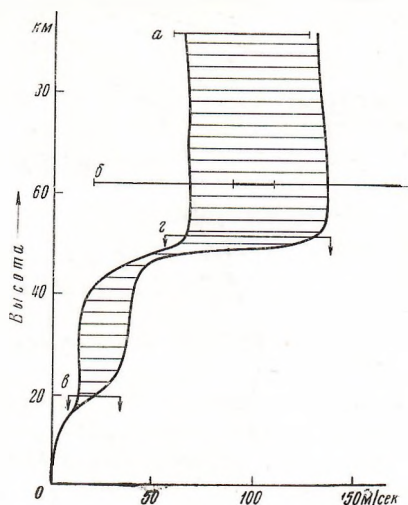


Рис. 4. «Ветровая модель» атмосферы Венеры: а — у.-ф. фотографии, б — спектроскопические измерения, в — «Венера-8», г — «Венера-4, 7, 8»

только меридиональному движению, как это принималось при первоначальной интерпретации, но и зональному движению в сторону обратного вращения Венеры. В этих условиях отчетливо проявляется определенная согласованность измерений, что наглядно иллюстрируется рис. 3, на котором профили измерений «Венеры-4» и «Венеры-7» сдвинуты как целое на величины, лежащие в пределах систематических погрешностей, причем для «Венеры-4» скорость дана в пересчете на зональную компоненту. Пунктиром показана скорость ветра, отвечающая измерениям «Венеры-7» на участке непосредственно после начала приема сигнала со спускаемого аппарата ( $8^h02^m50^s$ — $8^h04^m20^s$ ) (<sup>15</sup>).

Сопоставление полученных профилей скорости ветра и направлений измеренных компонент приводит к выводу, что схема циркуляции в атмосфере Венеры может заметно отличаться как от «глубокой» циркуляции, так и от схемы, полученной в численных экспериментах. С оговоркой на ограниченность наших данных и возможность наложения местных явлений можно предполагать, что одной из схем, удовлетворяющих измерениям «Венер», является круговое движение, в экваториальной зоне Венеры, совпадающее с направлением ее собственного вращения вокруг оси.

Исследования перемещения деталей на диске Венеры в ультрафиолетовых лучах (<sup>9</sup>, <sup>10</sup>) показывают, что движение аналогичного вида, по-видимому, имеет место и в атмосфере на высотах около 100 км. Скорости ветра на этих высотах изменяются от 70 до 130 м/сек при среднем периоде циркуляции  $\approx 4,5$  суток. Интересно, что в области начала измерений «Венер» скорости ветра оказываются близкими к значениям характерным для четырехсуточной циркуляции. На высотах же 20—40 км период циркуляции может составлять 12 суток и более. Если циркуляция такого вида является реальной, то измерения «Венер», относящиеся к различным участкам планеты, отражают долгоотно-временную изменчивость движения. Измерения дифференциального доплеровского сдвига полос  $\text{CO}_2$  в инфракрасной области (<sup>14</sup>), относящихся уже к видимому облачному слою ( $\approx 60$ —70 км), указывают на возможность движений со скоростями до 100 м/сек и на этих высотах.

Используя измерения «Венер», данные у.-ф. фотографии и спектроскопических измерений, можно представить «ветровую модель» экваториаль-



ной зоны Венеры в виде, показанном на рис. 4. Заштрихованные области соответствуют возможным вариациям скорости ветра, отвечающим различным измерениям.

Таким образом, в атмосфере Венеры, по крайней мере в слое  $\leq 100$  км над поверхностью, по-видимому, имеет место устойчивое зональное движение типа круговой циркуляции, характеризующееся сложной зависимостью нарастания градиента скорости ветра от высоты. Можно думать, при малой скорости собственного вращения планеты горизонтальный перенос играет значительно большую роль в выравнивании неравномерности разогрева ее атмосферы за счет изменения суточной инсоляции, чем это имеет место на Земле, где скорости горизонтальных движений обычно менее  $0,1\lambda$  и достигают  $1,7-1,8\lambda$  лишь в термосфере, на высотах  $300-350$  км. На Венере это значение достигается уже на  $10$  км, а вблизи  $50$  км составляет около  $50\lambda$  \*. К сожалению, о механизме поддержания круговой циркуляции в настоящее время известно очень мало. Некоторым экспериментальным аналогом может служить обнаруженное в <sup>(12)</sup> обратное движение жидкости при подогреве ее медленно вращающимся источником тепла, хотя возможность применения такой аналогии к атмосфере Венеры требует дополнительных теоретических экспериментальных подтверждений.

К важным следствиям приводит изучение профилей скорости ветра вблизи поверхности. До последнего времени существовало мнение, что сухая атмосфера Венеры может содержать много пыли. Источниками пыли на планете служат вулканическая деятельность, пыль космического происхождения и ветровая эрозия. Отсутствие влаги, способствующей очистке атмосферы и образованию связанных соединений, является фактором, благоприятствующим процессу возникновения пыли. Вместе с тем, этот фактор, наряду с постоянством температуры у поверхности, можно рассматривать как аргумент против большого количества пыли, поскольку наличие влаги и температурных контрастов способствует разрушению поверхностных пород. Верхний предел измеренного с Земли содержания  $\text{SO}_2$  в атмосфере Венеры можно интерпретировать как указание на то, что вулканическая деятельность не может приводить к заметной запыленности <sup>(13)</sup>. Если теперь сопоставить измерения скорости ветра вблизи поверхности, проведенные на «Венере-8», с оценками процессов ветровой эрозии на Венере, приведенными в работе <sup>(14)</sup>, можно прийти к выводу, что скорость ветра у поверхности оказывается недостаточной для подъема несвязанных частиц, не говоря уже об абразивной эрозии.

Небольшая запыленность атмосферы Венеры подтверждается прямыми измерениями освещенности, проведенными на АМС «Венера-8», которые показали, что ниже  $32$  км атмосфера практически свободна от аэрозоля. О сравнительно малой запыленности свидетельствует также адиабатический ход температуры вплоть до самой поверхности.

Институт прикладной математики  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
21 VI 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> М. Я. Маров, В. С. Авдеевский и др., ДАН, т. 210, № 3 (1973). <sup>2</sup> М. Я. Маров, О. Л. Рябов, Препринт ИПМ № 39, 1972. <sup>3</sup> В. С. Авдеевский, М. Я. Маров и др., ДАН, т. 210, № 4 (1973). <sup>4</sup> R. Goody, A. Robinson, *Astrophys. J.*, v. 146, 339 (1966). <sup>5</sup> С. С. Зилигиневич, А. С. Мокин и др., ДАН, т. 197, № 6 (1971). <sup>6</sup> Е. Н. Лоренц, Теория и природа общей циркуляции атмосферы, Л., 1970. <sup>7</sup> Г. С. Голицын, ДАН, т. 190, № 2, 323 (1970). <sup>8</sup> V. V. Kerzhanovich, M. Ya. Marov, M. K. Rozhdestvensky, *Icarus*, v. 17, № 3 (1972). <sup>9</sup> Ch. Boyer, P. Guerin, *Icarus*, v. 11, 333 (1969). <sup>10</sup> A. H. Scott, E. J. Reese, *Icarus*, v. 17, 589 (1972). <sup>11</sup> W. A. Traub, N. P. Carleton, *Bull. Am. Astron. Soc.*, v. 3, 278 (1971). <sup>12</sup> G. Schubert, J. Whitehead, *Science*, v. 163, 71 (1969). <sup>13</sup> Д. П. Крушкенк, В сборн. Физика Луны и планет, «Наука», 1972, стр. 83. <sup>14</sup> L. B. Ronca, R. R. Green, *Astrophys. Space Phys.*, v. 8, 57 (1970). <sup>15</sup> Б. Н. Андреев, В. Т. Гусляков, *Космич. исслед.*, т. 12, в. 3 (1974).

\*  $\lambda$  — отношение линейных скоростей ветра и поверхности планеты.