

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ***В. В. Мисневич*

В ракетных экспериментах, выполняемых в США, ракета является не только подъемным устройством, но и прибором, производящим измерения в атмосфере, так как различного рода датчики размещаются на самой ракете.

В СССР в Институте прикладной геофизики АН СССР при изучении структурных параметров верхней атмосферы ракета используется только для подъема аппаратуры вверх. Измерения же ведутся вдали от ракеты на контейнере. Контейнер поднимается в мортире ракеты до определенной высоты. На заданной высоте он выстреливается из мортиры и продолжает свое движение по инерции. В момент отделения контейнера от ракеты на нем включается измерительная аппаратура и начинаются измерения в атмосфере. При падении вниз раскрывается парашют, и контейнер, сохраняя всю аппаратуру, приземляется.

Применение контейнера дает возможность в значительной степени уменьшить возмущающее действие тела на среду (выделение газов, нарушение температуры окружающего воздуха и т. д.).

В настоящей работе описывается аппаратура и результаты измерения давления в верхних слоях атмосферы (50—100 км) при помощи неустойчивого контейнера.

АППАРАТУРА

Как известно, исследования, проводимые с помощью ракет, представляют собой трудную экспериментальную задачу.

Ракета движется с громадной сверхзвуковой скоростью, пересекая пространство в 200—500 км за несколько минут. На активном участке, сильно вибрируя, ракета движется с большими ускорениями, при этом частота вибрации изменяется в широком диапазоне. Вес и размеры поднимаемой ракетой научной аппаратуры сильно ограничены.

Вследствие этого аппаратура, используемая для измерения давления и поднимаемая на ракете, должна быть малоинерционна, обладать большой прочностью, иметь небольшой вес и габариты; кроме того, отсутствие человека при экспериментах требует, чтобы аппаратура работала автоматически. Эти требования сильно ограничивают возможность применения сложных и высокочувствительных приборов.

Исходя из указанных предъявляемых к аппаратуре требований, нами для измерения давления были выбраны два типа манометров:

- 1) магнитный электроразрядный манометр,
- 2) тепловой манометр.

Эти манометры широко используются в лабораторных исследованиях, и поэтому мы не станем их описывать.

С помощью магнитных электроразрядных манометров измерялось давление в интервале $5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Тепловыми манометрами измерялось давление в интервале $8 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

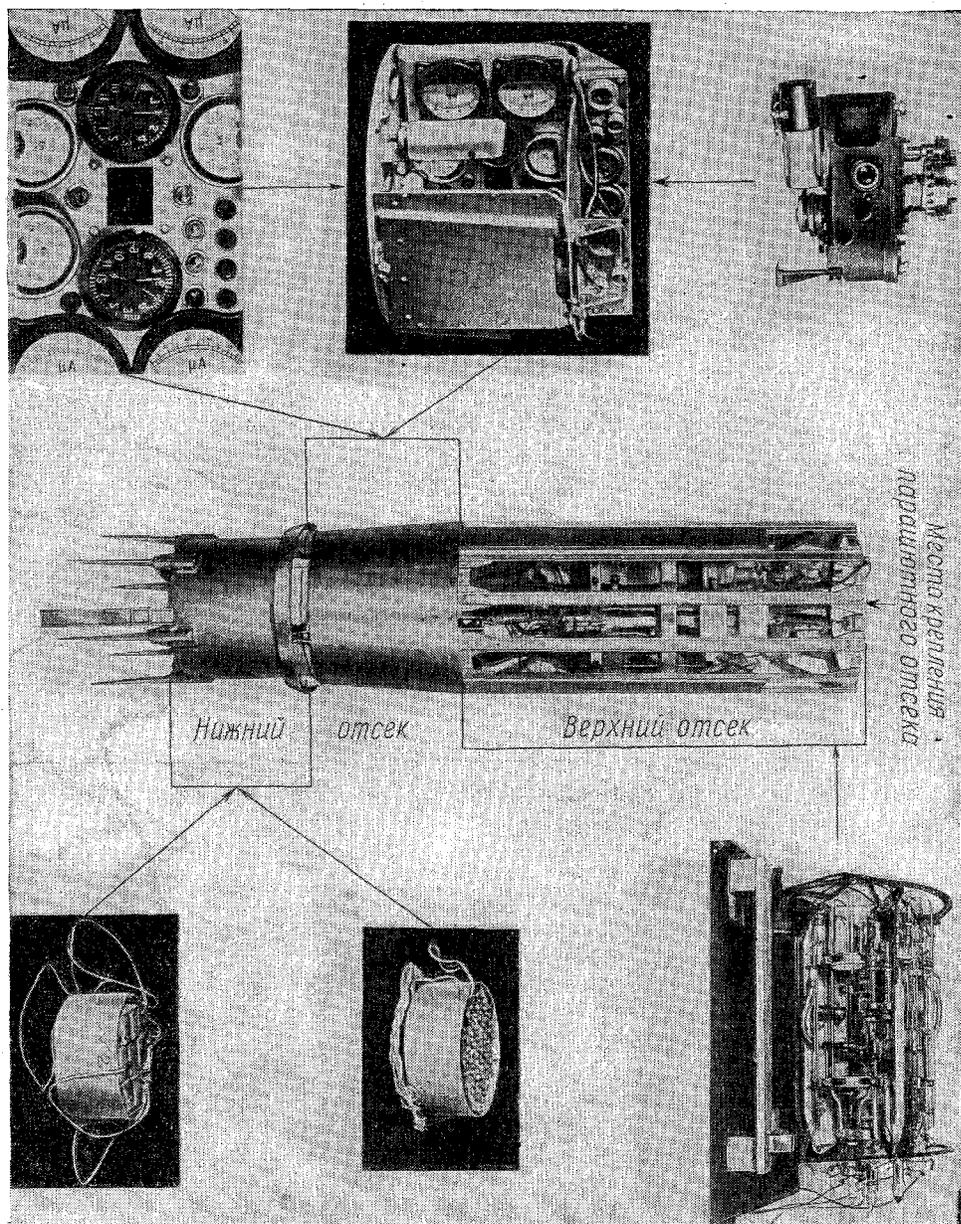


Рис. 1. Контейнер.

В верхнем, ажурном отсеке контейнера (рис. 1) размещаются датчики манометров. Заборные отверстия манометров находятся в местах, где, как показали продувки, отклонение местного давления от статического не более $\pm 30\%$ для углов атак, не превышающих 20° и числе Маха не более 2,7.

В нижнем отсеке контейнера помещаются измерительные приборы, фоторегистратор, часы, автоматика, электропитание. Отсек герметически закрыт. В нем, как и в герметическом трубопроводе, по которому идут высоковольтные провода в верхнем отсеке, во время всего эксперимента сохраняется нормальное атмосферное давление. Электропровода через специальные вакуумные разъемы выходят из нижнего отсека в верхний.

Регистрация давлений осуществляется фотографированием показаний измерительных приборов, размещенных на панели. Съемка производится каждые 1,3—1,5 сек. Включение автоматики и манометров происходит с помощью специальных ключей в момент отделения контейнера от ракеты.

Манометры поднимаются с земли запаянными, с определенным фиксированным давлением внутри. На заданной высоте разбивается специальное раздутие (рис. 2), находящееся на конце манометра, и манометр, соединяясь с атмосферой, начинает вести измерение давления в окружающей атмосфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Давление. Рассмотрим результаты двух серий измерений давлений, проведенных в Средней Европейской части СССР (июль, август, сентябрь месяцы).

I серия. Пуски приборных контейнеров были произведены на рассвете. На каждом контейнере было установлено два тепловых и два магнитных электроразрядных манометра. На рис. 3 показаны результаты измерения давления на различных контейнерах. Каждая из кривых построена по данным измерений давления одновременно двумя манометрами при подъеме и спуске. Как видно из графика, результаты измерений давления на разных контейнерах отличаются между собой не более чем в два раза, а от средней кривой — на $\sim 50\%$.

II серия. Измерения проводились утром. Аппаратура устанавливалась как в контейнере, так и на ракете. В головке ракеты размещались только тепловые манометры (в количестве 3—5 шт.), которые измеряли давление на высотах 50—70 км. В пределах ошибок измерений результаты измерения давления на контейнере совпали с данными по давлению, полученными на ракете.

Среднее значение давления, определенное из измерений I серии, и среднее значение давления по измерениям II серии согласуются между собой (рис. 4).

По результатам всех доброкачественных измерений I и II серий построена средняя кривая, представленная на рис. 4.

Средняя квадратичная ошибка определения среднего давления по сглаженной кривой из всех измерений I и II серий — порядка 10%.

Для высот 50—67 км и 90—105 км величина ошибки измерения больше, чем для высот 70—90 км. Сглаженные кривые на рис. 4 построены методом наименьших квадратов с учетом весов точек.

В таблице I и на рис. 5 и 6 представлены результаты определения давления различными исследователями Соединенных Штатов Америки по ракетным измерениям.

Анализ данных показывает, что до высоты 85 км значения давления, определенные на контейнере, в пределах ошибок измерений совпадают

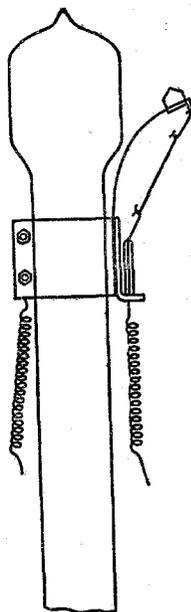


Рис. 2. Вид раздутия на конце манометра и молоток.

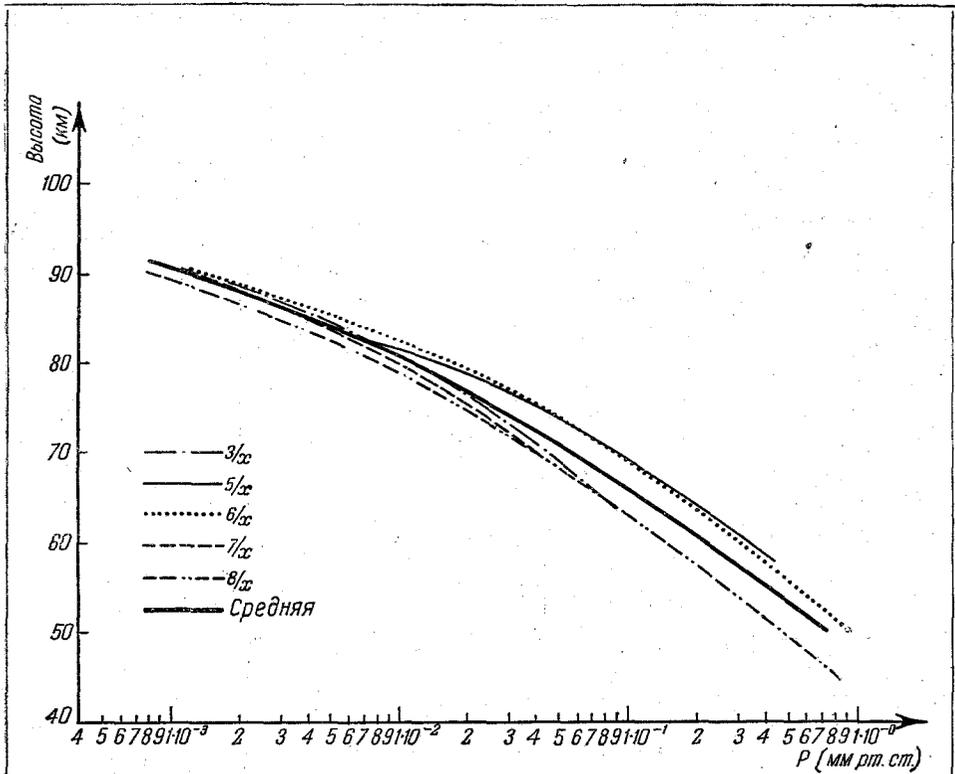


Рис. 3. Изменение давления с высотой по измерениям на разных контейнерах. 3/x, 5/x, 6/x, 7/x, 8/x — норма контейнеров.

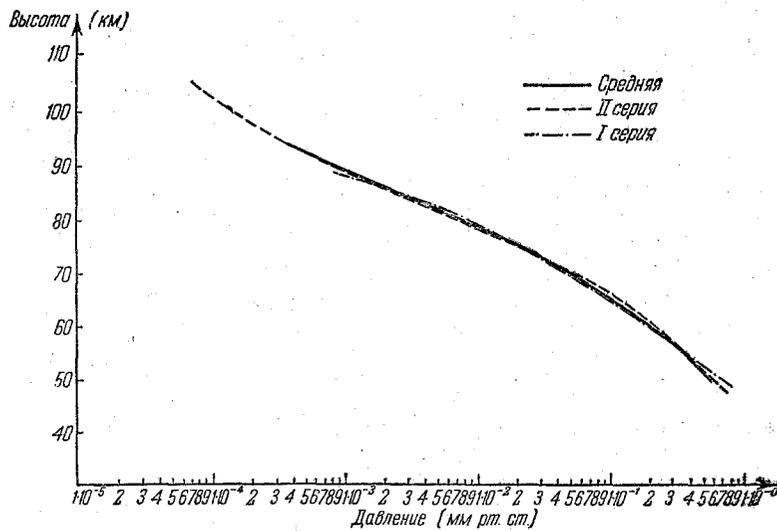


Рис. 4. Изменение среднего давления с высотой.

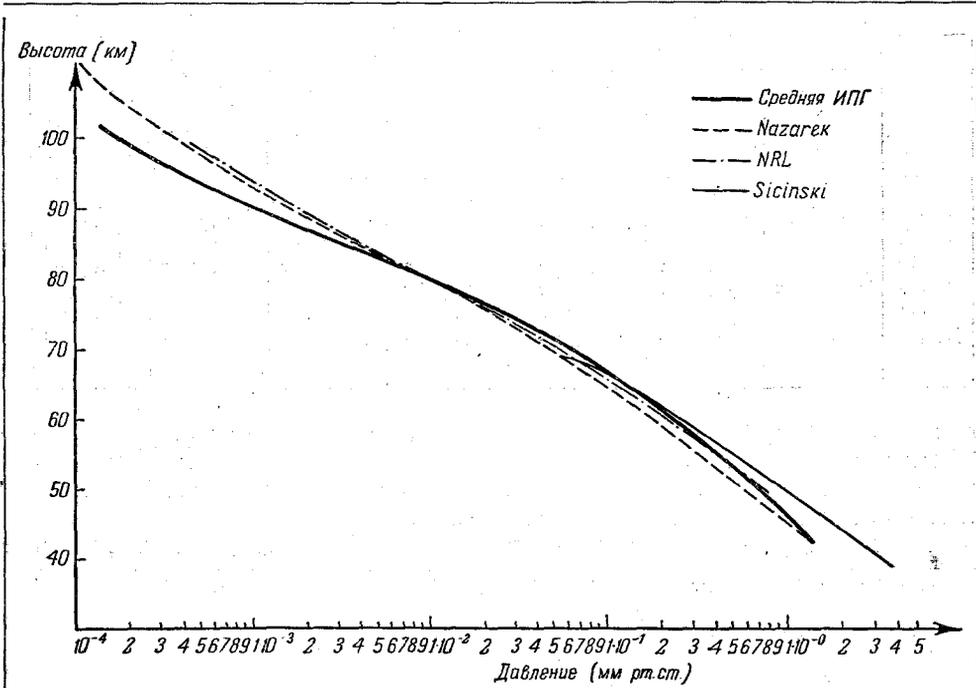


Рис. 5. Давление атмосферы по данным различных исследователей.

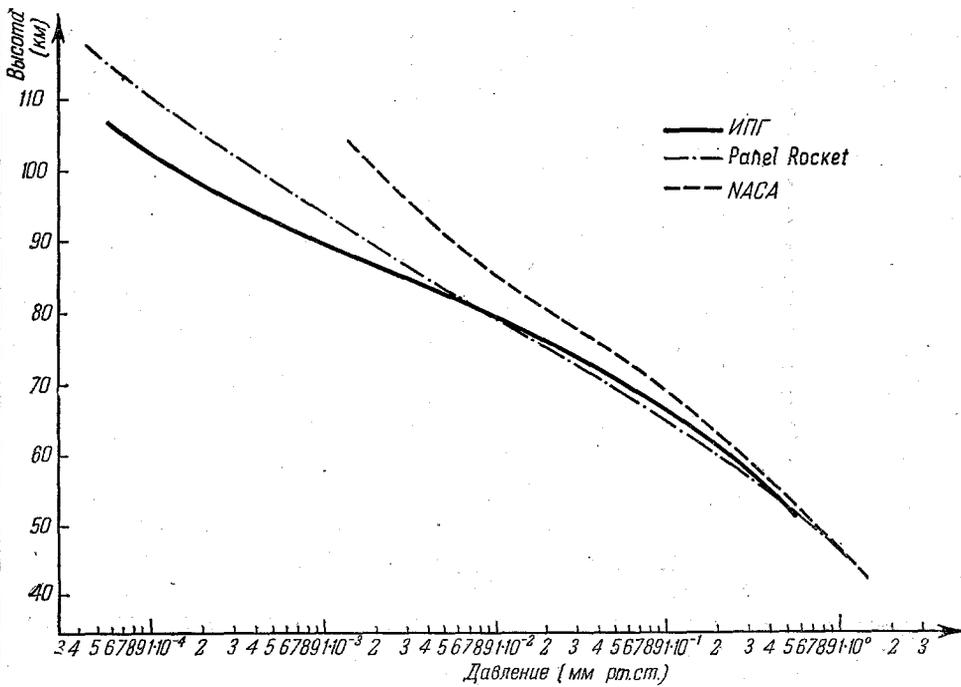


Рис. 6. Давление как функция высоты. Стандартная американская кривая, определенная по косвенным измерениям.

Таблица I

Высота, м	Давление, мм рт. ст.						
	СССР (ИПГ АН)			США			
	I серия	II серия	среднее	Nazarek ¹	NRL ²	Sicinski ³	Ракетный комитет ⁴
50 000	$6,8 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-1}$	$5,41 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-1}$
60 000	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$1,83 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$
70 000	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$5,01 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
80 000	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	—	$9,3 \cdot 10^{-3}$
90 000	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	—	$1,9 \cdot 10^{-3}$
100 000	—	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	—	$4,4 \cdot 10^{-4}$

со значениями давления, полученными при измерениях на ракетах; выше 85 км величина давления, измеренная на контейнере, меньше, чем на ракете. Большие значения давления, полученные при измерениях на ракетах, объясняются гашением самой ракеты.

Температура. В наших экспериментах мы не производили измерения температуры непосредственно. Температура атмосферы рассчитывалась

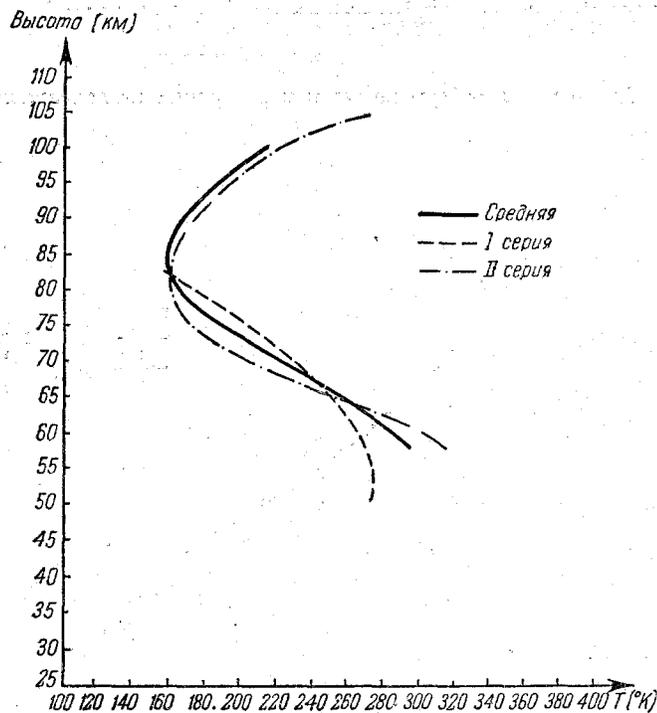


Рис. 7. Изменение температуры с высотой.

по давлению, определенному нами в ракетных исследованиях; для чего использовалась барометрическая формула

$$T = \frac{h - h_0}{\ln \frac{p_0}{p}} \frac{g}{R},$$

где p_0 и p — давление на высоте h_0 и h соответственно, g — ускорение силы тяжести, изменяющееся с высотой, T — средняя температура слоя и R — газовая постоянная для сухого воздуха.

Расчет велся в предположении, что состав воздуха вплоть до высоты 100 км неизменен, воздух сухой, молекулярный вес равен 29.

На рис. 7 приведены значения температуры, вычисленные по среднему давлению I серии измерений, II серии измерений и по среднему давлению, определенному из всех измерений I и II серий.

Рассмотрение данных по температуре позволяет установить, что на высоте 80—85 км имеется температурный минимум, на высоте около 55 км — температурный максимум. Это соответствует результатам наблюдений других исследователей (рис. 8). По данным Ракетного коми-

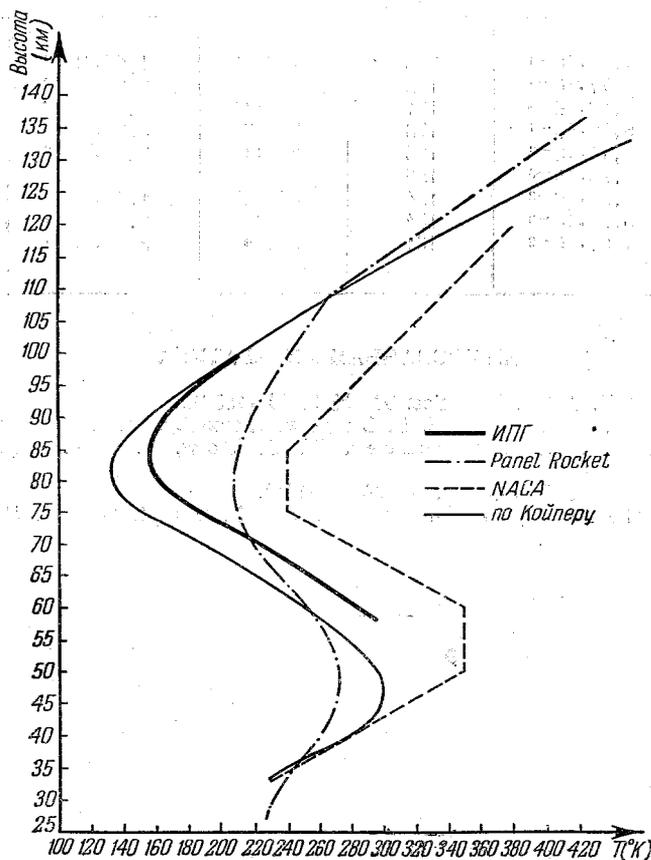


Рис. 8. Температура атмосферы. ИИГ АН СССР — температура вычислена по среднему давлению.

тета, Койпера⁵ и других, температурный минимум расположен на высоте 80—85 км. Однако полученное нами значение температуры в минимуме ($154^\circ\text{K} \pm 30^\circ\text{K}$) существенно отличается от соответствующей средней величины Ракетного комитета США (200°K) и равно в пределах ошибок измерений величине температуры в минимуме по данным Койпера, который получил распределение температуры по косвенным измерениям (в основном спектроскопическим).

По нашему мнению, в настоящее время ни в США, ни у нас не имеется достаточного количества измерений по определению структуры

атмосферы на высотах выше 80 км, чтобы можно было дать предпочтительные тем или иным результатам.

В таблице II приведены значения давления, определенные по сглаженной кривой, проведенной методом наименьших квадратов по точкам, являющимся средними арифметическими значениями давления из всех измерений, и соответствующие значения температуры верхней атмосферы (в таблице даны округленные значения). Средняя квадратичная ошибка приведенных значений температуры — около 20%.

Таблица II

Высота в метрах	p , мм рт. ст.	T° К	Высота в метрах	p , мм рт. ст.	T° К
100 000	$1,81 \cdot 10^{-4}$	208	77 500	$1,69 \cdot 10^{-2}$	172
97 500	$2,77 \cdot 10^{-4}$	192	75 000	$2,69 \cdot 10^{-2}$	187
95 000	$4,30 \cdot 10^{-4}$	181	72 500	$4,14 \cdot 10^{-2}$	204
92 500	$6,90 \cdot 10^{-4}$	173	70 000	$6,05 \cdot 10^{-2}$	221
90 000	$1,15 \cdot 10^{-3}$	163	67 500	$8,75 \cdot 10^{-2}$	237
87 500	$1,93 \cdot 10^{-3}$	156	65 000	$1,23 \cdot 10^{-1}$	245
85 000	$3,35 \cdot 10^{-3}$	154	62 500	$1,71 \cdot 10^{-1}$	263
82 500	$5,90 \cdot 10^{-3}$	154	60 000	$2,39 \cdot 10^{-1}$	282
80 000	$1,01 \cdot 10^{-2}$	161	57 500	$3,15 \cdot 10^{-1}$	303

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Nazarek, Bull. Amer. Met. Soc. 31, № 2, 44 (1950).
2. R. L. Havens, P. T. Kole, H. E. Lagow, J. Geophys. Res. 57, № 1 (1952).
3. H. S. Sicinski, N. W. Spencer, W. G. Dow, J. Appl. Phys. 25, № 2, 161 (1954).
4. Panel Rocket, Phys. Rev. 88, № 5 (1952).
5. Kuiper, The Atmospheres of the Earth and Planets, Chicago, 1952; p. 417.