

# СВОДКА РАКЕТНЫХ ДАННЫХ О СТРОЕНИИ ВЫСОКИХ СЛОЁВ АТМОСФЕРЫ НА ЯНВАРЬ 1952 г.

Полгода назад в нашем журнале были опубликованы некоторые данные о температуре, давлении и плотности атмосферы до высоты 160 км<sup>1</sup>. В настоящее время опубликована критическая сводка всех данных о температуре, давлении и плотности верхних слоёв атмосферы, полученных путём измерений при помощи аппаратуры, поднимаемой на ракетах<sup>2</sup>. Сводка охватывает 138 подъёмов, произведённых с апреля 1946 г. по январь 1952 г. четырьмя группами исследователей.

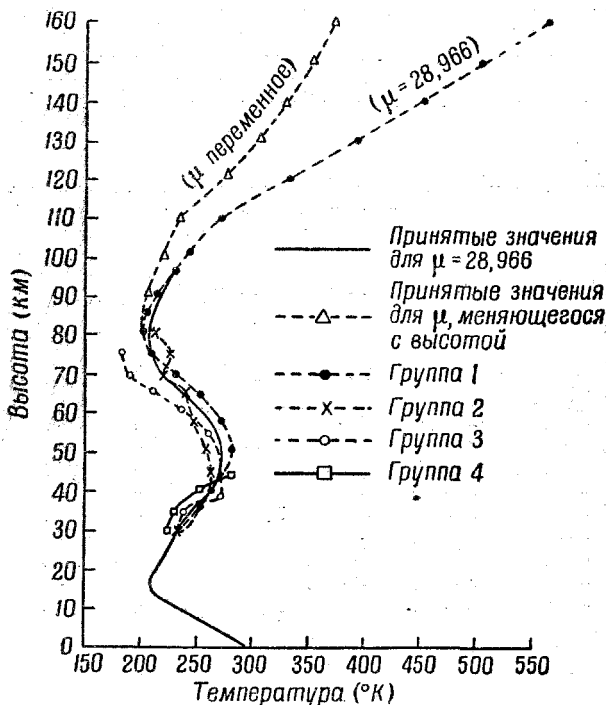


Рис. 1. Средняя температура воздуха на различных высотах.

Первая группа (R. Havens, R. Koll и H. Lagow) измеряли давление близ поверхности ракеты в некоторых специально выбранных точках, в которых согласно гидродинамическим расчётам давление (в отсутствие рыскания ракеты) совпадает с давлением  $p$  окружающей среды. Авторами сводки использованы данные шести подъёмов, при которых были получены наиболее надёжные результаты. Температура определялась по высотному градиенту  $\lg p$ . Кроме того, использованы данные четырёх подъёмов, во время которых измерялось гидродинамическое давление в носовой части ракеты, откуда вычислялась плотность  $\rho$  окружающей атмосферы.

Вторая группа (M. Ferencic и др.) определяла плотность воздуха из данных о вертикальной скорости распространения звука, полученных путём взрывов гранат, поднимаемых на ракетах, и измерения времени рас-

пространения звуковой волны до земной поверхности (всего 5 подъёмов ракет).

Третья группа (H. S. Sicinski, N. W. Spencer и W. G. Dow) определяла давление на поверхности конической носовой части ракеты у вершины конуса и на некотором (малом) расстоянии от неё, откуда (на основании гидродинамической теории обтекания конуса) определялось число Маха и из него температура окружающего воздуха. Авторы сводки указывают, что теория, лежащая в основе этих измерений, повидимому, перестаёт быть справедливой при значительном рыскании ракеты.

Четвёртая группа (Bartman, Lik и Schaefer) измеряла во время одного из подъёмов угол ударной волны у носовой части ракеты и отсюда определяла число Маха. Таким образом, измерения велись пятью различными методами. Для того чтобы сделать эти данные сопоставимыми, во всех случаях вычислялась температура, причём предполагалось, что во всём интервале высот плотность воздуха остаётся постоянной и равной 28,966 г/моль. Эта температура обозначается ниже  $T_{29}$ .

Таблица I

Наблюдённые средние и принятые значения температуры  $T_{29}$  на различных высотах (в °K)

| Высота | Группа 1 | Группа 2 | Группа 3 | Группа 4 | Взвешенное среднее | Принятые значения |
|--------|----------|----------|----------|----------|--------------------|-------------------|
| 30     | 232 (12) | 235 (9)  | 230 (6)  | 227 (5)  | 231,7 (32)         | 231,7             |
| 35     | 249 (12) | 249 (9)  | 238 (6)  | 234 (5)  | 244,6 (32)         | 244,5             |
| 40     | 264 (12) | 260 (9)  | 271 (6)  | 253 (5)  | 262,5 (32)         | 262,5             |
| 45     | 273 (12) | 264 (9)  | 272 (6)  | 278 (5)  | 271,1 (32)         | 271,3             |
| 50     | 280 (12) | 260 (9)  | 268 (6)  |          | 270,7 (27)         | 270,8             |
| 55     | 278 (12) | 252 (9)  | 258 (5)  |          | 265,2 (26)         | 265,8             |
| 60     | 262 (12) | 243 (9)  | 238 (5)  |          | 250,8 (26)         | 252,8             |
| 65     | 248 (12) | 238 (9)  | 209 (5)  |          | 237,0 (26)         | 235,0             |
| 70     | 228 (12) | 218 (9)  | 189 (5)  |          | 217,0 (26)         | 218,0             |
| 75     | 208 (12) | 227 (9)  | 185 (5)  |          | 210,2 (26)         | 209,1             |
| 80     | 200 (8)  | 213 (5)  |          |          | 205,0 (13)         | 205,0             |
| 85     | 205      |          |          |          | 205                | 208,9             |
| 90     | 216      |          |          |          | 216                | 217,0             |
| 95     | 229      |          |          |          | 229                | 227,5             |
| 100    | 240      |          |          |          | 240                | 240,0             |
| 110    | 270      |          |          |          | 270                | 270,0             |
| 120    | 330      |          |          |          | 330                | 330,0             |
| 130    | 390      |          |          |          | 390                | 390,0             |
| 140    | 450      |          |          |          | 450                | 447,0             |
| 150    | 500      |          |          |          | 500                | 503,0             |
| 160    | 560      |          |          |          | 560                | 560,0             |
| 219    | —        |          |          |          | 900                | 900,9             |

Сводка полученных данных приводится в таблице I и на рис. 1, где наряду с данными отдельных групп исследователей указывается статистический вес этих данных (в скобках), взвешенное среднее значение  $T_{29}$  и принятое среднее значение  $T_{29}$ , полученное путём сглаживания кривой зависимости  $T_{29}$  от высоты  $h$  над уровнем моря. Для высот больших 122 км

данные основываются на измерениях плотности воздуха группой 1. В интервале высот 61—73 км значения  $T_{29}$ , полученные этим путём, несколько выше, чем данные непосредственного измерения внешнего давления, но на больших высотах значения  $T_{29}$ , полученные обоими методами, сближаются.

Группа 1 производила измерения только днём; группа 2 — только ночью. При образовании среднего  $T_{29}$  не принимались во внимание ни суточные, ни сезонные, ни широтные различия в условиях измерения. В данных группы 2 возможно наличие систематической ошибки, не превышающей, однако,  $4^\circ \text{К}$ . Ниже 30 км данные привязаны к данным измерений, производившихся при помощи радиозондов на испытательном полигоне в Бедых Песках. Вблизи поверхности земли данные привязаны к среднему годовичному давлению (но не температуре).

На рис. 1 показаны также значения температуры, вычисленные в предположении, что выше 80 км средний молекулярный вес  $\mu$  меняется в результате диссоциации кислорода и азота, причём произвольно принято, что диссоциация кислорода меняется линейно от 0 на высоте 80 км до 100% на высоте 120 км, а диссоциация азота — также линейно от 0 на высоте 120 км до 100% на высоте 220 км.

В таблице II (см. стр. 149, 150) приведены принятые усреднённые значения  $T_{29}$ ,  $\lg p$  (в  $\text{дин}/\text{см}^2$ ) и  $\lg \rho$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ). Эти данные соответствуют сглаженным кривым зависимости от высоты над уровнем моря и точность приводимых величин значительно выше, чем точность экспериментальных данных, использованных при их вычислении. Это сделано с учётом того, чтобы обеспечить должную точность при численном интегрировании этих данных по высотам.

Выше 160 км достоверность данных падает в возрастающей с высотой мере. Эти данные основаны на наблюдениях группы 1, давших значение плотности  $\rho = 1,0 \cdot 10^{-13} \text{ г}/\text{см}^3$  на высоте 219 км (7 авг. 1951 г.). Это значение невозможно согласовать со значением  $\rho = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ г}/\text{см}^3$  на высоте 156 км, если предположить постоянным градиент температуры. В этом интервале высот предположено постоянство градиента так называемой толщины однородной атмосферы

$$H = \frac{RT}{g\mu}$$

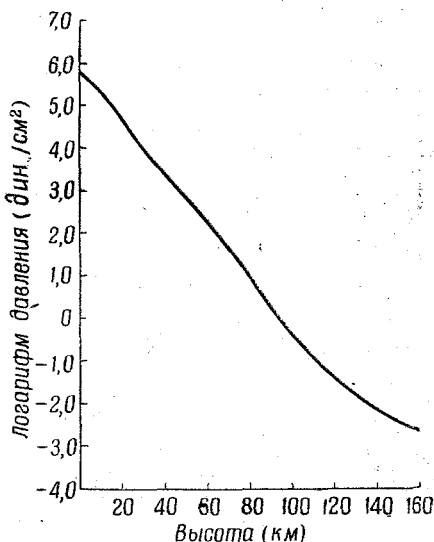


Рис. 2. Среднее давление воздуха на различных высотах.

Значения давления получены на основе значений  $T_{29}$  путём численного интегрирования (через 2 км) из уравнения  $\frac{d(\lg p)}{dh} = -\frac{1}{H}$ . Средние данные о зависимости давления и плотности от высоты приведены на рис. 2 и 3.

Таблица III (см. стр. 151) составлена на основе указанного выше предположения о диссоциации кислорода и азота. До 70 км по данным ракетных измерений средний молекулярный вес воздуха неизменен. Около 70 км наблюдались незначительные отклонения. Данные, полученные из анализа

проб воздуха, взятых в три стальных баллона в интервале высот 64—72 км, показали увеличение (примерно вдвое) отношения  $\text{H}_2/\text{N}_2$  в этом интервале высот, слабый рост отношения  $\text{Ne}/\text{N}_2$  и слабое убывание отношения  $\text{A}/\text{N}_2$ . Ввиду неопределённости вопроса о диффузном разделении компонент воздуха оно не принималось во внимание при вычислении зависимости  $\mu$  от высоты.

Значения температуры определялись из соотношения

$$T = \frac{\mu}{28,966} T_{20},$$

значения  $g$  из закона обратной пропорциональности квадрату расстояния от центра Земли. Газовая постоянная принималась равной  $R =$

$$= 8,31436 \cdot 10^7 \text{ эрг/град} \cdot \text{моль}. \text{ Плотность находилась из равенства } \rho = \frac{\mu p}{RT},$$

а средняя длина свободного пробега молекул  $\lambda$  — из обратной пропорциональности её числу молекул в единице объёма, причём у земной поверхности принималось  $\lambda = 7,37 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ .

Авторы сводки отмечают, что данные группы 1 о плотности в интервале высот 60—80 км систематически выше среднего. Полагая, что это аппаратный эффект, они всё же указывают, что расхождения данных, полученных группой 1 различными методами, меньше.

Далее авторы указывают, что имеются серьёзные экспериментальные основания считать, что приводимые ими средние значения плохо отражают состояние атмосферы в тот или иной момент времени. В действительности, повидимому, имеются значительные суточные, сезонные и широтные вариации. Так, например, группа 2 обнаружила заметные различия в данных, полученных в течение одной и той же ночи с интервалом в несколько часов. Однако имеющиеся сведения совершенно недостаточны для каких бы то ни было уверенных суждений о характере этих вариаций и их корреляции с солнечной активностью, магнитными вариациями, полярными сияниями и состоянием ионосферы.

Авторы полагают, что в действительности температурный максимум на высотах около 50 км

Рис. 3. Средняя плотность воздуха на различных высотах.

(рис. 1) для какого-нибудь данного момента времени не представляет собой гладкой кривой, а имеет ряд пиков, причём высота его варьирует в пределе около 10 км. То же, по мнению авторов, относится и к температурному минимуму около 80 км.

С другой стороны, ракетные данные не обнаруживают сезонных вариаций, в то время как метеорные данные указывают на большие плотности летом, чем зимой, причём этот эффект различен на различных широтах. Отмечается также, что метеорные эффекты коррелируют с температурой у земной поверхности и резко выражены на высотах 60—70 км (порядка 0,3 единицы в  $\lg \rho$ ), чем на высотах около 90 км.

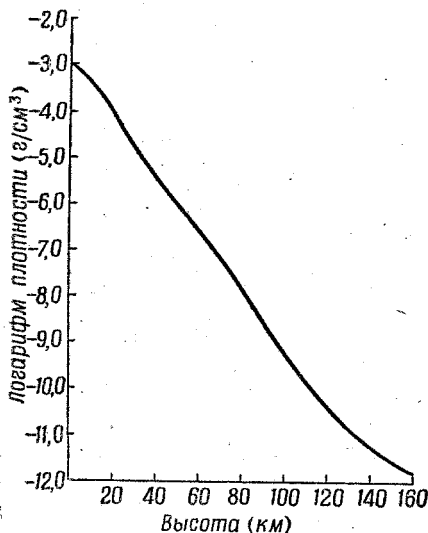


Таблица II

Принятые значения температуры, давления и плотности атмосферы на различных высотах в предположении постоянства молекулярного веса

| Высота<br>над уровнем<br>моря (км) | Температура $T_{29}$ (°K)<br>( $\mu = 28,966$ ) | $\lg p$ (дин/см <sup>2</sup> ) | $\lg \rho$ (г/см <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1,216                              | 291,0                                           | 5,945                          | -2,977                          |
| 2                                  | 282,0                                           | 5,905                          | -3,003                          |
| 4                                  | 272,6                                           | 5,799                          | -3,095                          |
| 6                                  | 260,0                                           | 5,688                          | -3,185                          |
| 8                                  | 245,0                                           | 5,571                          | -3,276                          |
| 10                                 | 230,8                                           | 5,446                          | -3,375                          |
| 12                                 | 219,5                                           | 5,315                          | -3,484                          |
| 14                                 | 211,6                                           | 5,178                          | -3,606                          |
| 16                                 | 208,0                                           | 5,037                          | -3,739                          |
| 18                                 | 209,0                                           | 4,895                          | -3,883                          |
| 20                                 | 212,8                                           | 4,755                          | -4,030                          |
| 22                                 | 216,7                                           | 4,618                          | -4,176                          |
| 24                                 | 220,9                                           | 4,484                          | -4,318                          |
| 26                                 | 225,1                                           | 4,352                          | -4,458                          |
| 28                                 | 228,5                                           | 4,222                          | -4,594                          |
| 30                                 | 231,7                                           | 4,095                          | -4,728                          |
| 32                                 | 235,7                                           | 3,969                          | -4,861                          |
| 34                                 | 241,2                                           | 3,846                          | -4,994                          |
| 36                                 | 248,1                                           | 3,726                          | -5,126                          |
| 38                                 | 255,6                                           | 3,610                          | -5,256                          |
| 40                                 | 262,5                                           | 3,497                          | -5,380                          |
| 42                                 | 267,6                                           | 3,386                          | -5,499                          |
| 44                                 | 270,5                                           | 3,278                          | -5,612                          |
| 46                                 | 271,7                                           | 3,170                          | -5,722                          |
| 48                                 | 271,6                                           | 3,062                          | -5,829                          |
| 50                                 | 270,8                                           | 2,955                          | -5,936                          |
| 52                                 | 269,7                                           | 2,847                          | -6,042                          |
| 54                                 | 267,6                                           | 2,738                          | -6,147                          |
| 56                                 | 263,7                                           | 2,629                          | -6,250                          |
| 58                                 | 258,6                                           | 2,517                          | -6,353                          |
| 60                                 | 252,8                                           | 2,404                          | -6,457                          |
| 62                                 | 246,5                                           | 2,287                          | -6,563                          |
| 64                                 | 239,0                                           | 2,167                          | -6,669                          |
| 66                                 | 231,0                                           | 2,044                          | -6,778                          |
| 68                                 | 223,2                                           | 1,916                          | -6,891                          |
| 70                                 | 218,0                                           | 1,784                          | -7,012                          |

Окончание табл. II

| Высота<br>над уровнем<br>моря (км) | Температура $T_{29}$ ( $^{\circ}\text{K}$ )<br>( $\mu = 28,966$ ) | $\lg p$ (дин/см <sup>2</sup> ) | $\lg p$ (г/см <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 72                                 | 213,6                                                             | 1,650                          | -7,138                       |
| 74                                 | 210,5                                                             | 1,513                          | -7,268                       |
| 76                                 | 207,9                                                             | 1,375                          | -7,401                       |
| 78                                 | 205,8                                                             | 1,235                          | -7,536                       |
| 80                                 | 205,0                                                             | 1,094                          | -7,676                       |
| 82                                 | 205,8                                                             | 0,953                          | -7,818                       |
| 84                                 | 207,7                                                             | 0,814                          | -7,962                       |
| 86                                 | 210,3                                                             | 0,675                          | -8,105                       |
| 88                                 | 213,5                                                             | 0,539                          | -8,248                       |
| 90                                 | 217,0                                                             | 0,405                          | -8,389                       |
| 92                                 | 220,7                                                             | 0,274                          | -8,528                       |
| 94                                 | 225,0                                                             | 0,144                          | -8,666                       |
| 96                                 | 230,0                                                             | 0,018                          | -8,802                       |
| 98                                 | 235,0                                                             | -0,106                         | -8,935                       |
| 100                                | 240,0                                                             | -0,227                         | -9,065                       |
| 102                                | 245,0                                                             | -0,345                         | -9,192                       |
| 104                                | 250,0                                                             | -0,461                         | -9,317                       |
| 106                                | 255,0                                                             | -0,575                         | -9,440                       |
| 108                                | 261,0                                                             | -0,686                         | -9,561                       |
| 110                                | 270,0                                                             | -0,794                         | -9,684                       |
| 115                                | 300,0                                                             | -1,045                         | -9,981                       |
| 120                                | 330,0                                                             | -1,273                         | -10,249                      |
| 125                                | 360,0                                                             | -1,480                         | -10,495                      |
| 130                                | 390,0                                                             | -1,670                         | -10,720                      |
| 135                                | 419,0                                                             | -1,845                         | -10,927                      |
| 140                                | 447,0                                                             | -2,009                         | -11,119                      |
| 145                                | 475,0                                                             | -2,163                         | -11,299                      |
| 150                                | 503,0                                                             | -2,308                         | -11,468                      |
| 155                                | 531,0                                                             | -2,445                         | -11,629                      |
| 160                                | 560,0                                                             | -2,574                         | -11,781                      |
| 170                                | 618,7                                                             | -2,813                         | -12,062                      |
| 180                                | 676,9                                                             | -3,030                         | -12,318                      |
| 190                                | 734,9                                                             | -3,228                         | -12,552                      |
| 200                                | 792,5                                                             | -3,411                         | -12,768                      |
| 210                                | 849,8                                                             | -3,580                         | -12,968                      |
| 220                                | 906,6                                                             | -3,738                         | -13,154                      |

Таблица III

Данные об атмосфере на различных высотах

| Высота<br>над<br>уровнем<br>моря<br>(км) | Принятый<br>молекуляр-<br>ный вес $\mu$<br>(г/моль) | Темпера-<br>тура для<br>принято-<br>го $\mu$<br>(°K) | Толщина<br>однород-<br>ной атмо-<br>сферы $H$<br>(км) | Ускорение<br>тяготения<br>$g$<br>(см/сек <sup>2</sup> ) | Средняя<br>длина сво-<br>бодного<br>пробега $\lambda$<br>(см) |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1,216                                    | 28,97                                               | 291,0                                                | 8,53                                                  | 979,2                                                   | $8,6 \cdot 10^{-6}$                                           |
| 5                                        | 28,97                                               | 276,8                                                | 7,83                                                  | 978,0                                                   | $1,2 \cdot 10^{-5}$                                           |
| 10                                       | 28,97                                               | 230,8                                                | 6,78                                                  | 976,5                                                   | $2,1 \cdot 10^{-5}$                                           |
| 15                                       | 28,97                                               | 209,1                                                | 6,16                                                  | 974,9                                                   | $4,2 \cdot 10^{-5}$                                           |
| 20                                       | 28,97                                               | 212,8                                                | 6,28                                                  | 973,4                                                   | $9,7 \cdot 10^{-5}$                                           |
| 25                                       | 28,97                                               | 223,0                                                | 6,59                                                  | 971,9                                                   | $2,2 \cdot 10^{-4}$                                           |
| 30                                       | 28,97                                               | 231,7                                                | 6,85                                                  | 970,4                                                   | $4,8 \cdot 10^{-4}$                                           |
| 35                                       | 28,97                                               | 244,5                                                | 7,24                                                  | 968,9                                                   | $1,0 \cdot 10^{-3}$                                           |
| 40                                       | 28,97                                               | 262,5                                                | 7,79                                                  | 967,3                                                   | $2,2 \cdot 10^{-3}$                                           |
| 45                                       | 28,97                                               | 271,3                                                | 8,06                                                  | 965,8                                                   | $4,2 \cdot 10^{-3}$                                           |
| 50                                       | 28,97                                               | 270,8                                                | 8,06                                                  | 964,3                                                   | $7,8 \cdot 10^{-3}$                                           |
| 55                                       | 28,97                                               | 265,8                                                | 7,93                                                  | 962,8                                                   | $1,4 \cdot 10^{-2}$                                           |
| 60                                       | 28,97                                               | 252,8                                                | 7,55                                                  | 961,3                                                   | $2,6 \cdot 10^{-2}$                                           |
| 65                                       | 28,97                                               | 235,0                                                | 7,03                                                  | 959,8                                                   | $4,8 \cdot 10^{-2}$                                           |
| 70                                       | 28,97                                               | 218,0                                                | 6,53                                                  | 958,4                                                   | $9,3 \cdot 10^{-2}$                                           |
| 75                                       | 28,97                                               | 209,1                                                | 6,27                                                  | 956,9                                                   | $2,0 \cdot 10^{-1}$                                           |
| 80                                       | 28,97                                               | 205,0                                                | 6,16                                                  | 955,4                                                   | $4,3 \cdot 10^{-1}$                                           |
| 85                                       | 28,23                                               | 203,6                                                | 6,29                                                  | 953,9                                                   | $9,5 \cdot 10^{-1}$                                           |
| 90                                       | 27,52                                               | 206,2                                                | 6,54                                                  | 952,4                                                   | $2,1 \cdot 10^0$                                              |
| 95                                       | 26,86                                               | 210,9                                                | 6,87                                                  | 951,0                                                   | $4,5 \cdot 10^0$                                              |
| 100                                      | 26,22                                               | 217,3                                                | 7,26                                                  | 949,5                                                   | $9,5 \cdot 10^0$                                              |
| 110                                      | 25,03                                               | 233,3                                                | 8,19                                                  | 946,6                                                   | $3,8 \cdot 10^1$                                              |
| 120                                      | 23,95                                               | 272,8                                                | 10,04                                                 | 943,6                                                   | $1,3 \cdot 10^2$                                              |
| 130                                      | 22,50                                               | 302,9                                                | 11,90                                                 | 940,7                                                   | $3,7 \cdot 10^2$                                              |
| 140                                      | 21,21                                               | 327,3                                                | 13,68                                                 | 937,9                                                   | $8,7 \cdot 10^2$                                              |
| 150                                      | 20,06                                               | 348,4                                                | 15,44                                                 | 935,0                                                   | $1,8 \cdot 10^3$                                              |
| 160                                      | 19,34                                               | 368,0                                                | 17,24                                                 | 932,1                                                   | $3,6 \cdot 10^3$                                              |
| 170                                      | 18,10                                               | 386,7                                                | 19,11                                                 | 929,3                                                   | $6,1 \cdot 10^3$                                              |
| 180                                      | 17,26                                               | 403,4                                                | 20,97                                                 | 926,4                                                   | $1,0 \cdot 10^4$                                              |
| 190                                      | 16,50                                               | 418,5                                                | 22,84                                                 | 923,6                                                   | $1,8 \cdot 10^4$                                              |
| 200                                      | 15,79                                               | 432,1                                                | 24,70                                                 | 920,8                                                   | $3,0 \cdot 10^4$                                              |
| 210                                      | 15,15                                               | 444,4                                                | 26,57                                                 | 918,0                                                   | $5,1 \cdot 10^4$                                              |
| 220                                      | 14,55                                               | 455,5                                                | 28,43                                                 | 915,2                                                   | $8,7 \cdot 10^4$                                              |

Широтный эффект был отмечен группой 1. Аналогичный эффект наблюдается и по метеорным данным и по данным звукометрическим<sup>4</sup>, обнаруживающим также отчетливые сезонные вариации и в температурах, и в скоростях, и направлениях ветров на высоте 30—60 км.

Таким образом, вопрос о вариациях условий в верхних слоях атмосферы остаётся полностью открытым. Авторы считают вероятным, что существенное значение имеют географические факторы и что эти вариации носят отчетливо выраженный метеорологический характер.

*Г. Р.*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. УФН 43, 609 (1952).
  2. Phys. Rev. 88, № 5, 1027 (1952).
  3. F. L. Wipple Bull. Am. Met. Soc. 33, 13 (1952).
  4. A. P. Crary, J. Meteor. 7, 233 (1950).
-