

*РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ*

# ИОНОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

сборник статей

№ 20

*отдельный оттиск*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

*Москва 1972*

Н. М. Шютте

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПРИ ПОМОЩИ АНАЛИЗАТОРА ФОТОЭЛЕКТРОНОВ

На высотных геофизических ракетах, запущенных осенью 1965 г., помимо экспериментов по измерению электронной концентрации [1] и электронной температуры [2], проводилось измерение поглощения ультрафиолетового излучения Солнца с целью получить сведения о состоянии верхних слоев атмосферы. Эти эксперименты основывались на измерении изменения фотоэмиссии электронов, эмиттированных под действием солнечного излучения с поверхности металла (платины).

В качестве чувствительного элемента для измерения фотоэмиссии использовался анализатор фотоэлектронов, аналогичный описанному в работе [3], но только с плоской наружной сеткой. Напряжения на электродах анализатора фотоэлектронов выбирались из тех же соображений, которыми руководствовались при аналогичных экспериментах раньше [3, 4], а именно: на фотокатоде примерно  $-20$  в, на наружной сетке примерно  $+20$  в, а на внутренней (анализирующей) сетке напряжение линейно изменялось от  $-18$  до  $-21$  в с периодом  $0,75$  сек<sup>1</sup>. Таким образом, ни положительные ионы, ни электроны из окружающего пространства не могли попасть на фотокатод анализатора. Эксперименты проводились 20 сентября и 1 октября при зенитных расстояниях Солнца  $\sim 83$  и  $\sim 81^\circ$  соответственно [1]. Установленные на ракетах анализаторы были направлены на Солнце. Положение ракеты во время полета стабилизировалось относительно ее осей с точностью  $+1-2^\circ$ , нормали к анализаторам фотоэлектронов составляли с направлением на Солнце угол не больше  $\pm 5^\circ$ . Максимальная высота подъема ракет составляла  $\sim 480$  км. Регистрация фототока начиналась с высоты примерно 80 км, и по мере подъема ракеты плотность фототока насыщения, соответствующего положительному относительно фотокатода потенциалу анализирующей сетки, возрастала от  $\sim 3 \cdot 10^{-10}$  до  $\sim 4 \cdot 10^{-9}$  а/см<sup>2</sup>. Естественно предположить, что наблюдаемое по мере подъема ракеты увеличение фототока обусловлено уменьшением поглощения ультрафиолетового излучения Солнца в верхних слоях атмосферы. Интегральный (по спектру) коэффициент поглощения солнечного излучения, рассчитанный по методике, описанной в работе [5], на высотах  $\sim 100-450$  км изменялся от  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$  до  $\sim 8 \cdot 10$  см<sup>-1</sup> соответственно.

Для получения данных о спектральном поглощении солнечного излучения была проанализирована форма зарегистрированных во время полета вольтамперных характеристик (рис. 1). Поскольку энергетическое распределение эмиттированных фотоэлектронов зависит от спектрального состава падающего излучения, форма вольтамперных характеристик анализировалась путем сопоставления экспериментальных характеристик с

<sup>1</sup> Аппаратура для питания анализатора и регистрации фототока была разработана В. Ф. Губским под руководством Г. Л. Гдалевича.

градуировочными характеристиками, полученными в лабораторных условиях, как это делалось в [4]. Из рис. 1 видно, что зарегистрированный фототок обусловлен в основном солнечным излучением в диапазоне длин волн больше  $\sim 650 \text{ \AA}$ .

Как показано на рисунке, для определения спектрального состава были использованы градуировочные вольтамперные характеристики для длин 740, 1026, 1216 и 1607  $\text{\AA}$ . Очевидно, что разрешающая способность использовавшегося метода анализа ограничена. В идеале такой метод применим в тех случаях, когда известно, например, что зарегистрированный спектр состоит исключительно из линий с заданными длинами волн, интенсивность которых нужно определить. Однако энергетическое распределение эмитированных фотоэлектронов не может быть существенно различным для близких длин волн. Это видно при сопоставлении вольтамперных характеристик, полученных при полете ракеты, с монохроматическими градуировочными. Следовательно, можно сделать вывод, что каждая из выбранных градуировок характеризует не отдельную длину волны в спектре Солнца, а некую спектральную область вблизи этой длины волны. В результате, использовавшиеся градуировочные вольтамперные характеристики позволили приблизительно разделить зарегистрированное интегральное излучение в диапазоне  $\lambda > \sim 650 \text{ \AA}$  на поддиапазоны с длинами волн  $\sim 700\text{--}910$ ,  $\sim 910\text{--}1050$  и больше 1050  $\text{\AA}$ . Вблизи вершины траектории ракеты фототок, обусловленный излучением указанных областей,

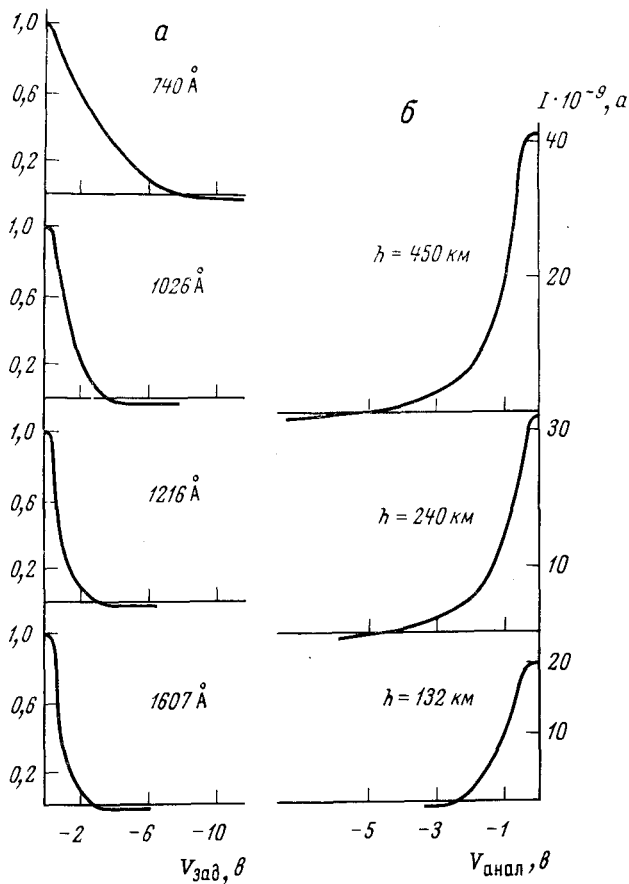


Рис. 1. Примеры вольтамперных характеристик

а — градуировочные вольтамперные характеристики (в отн. ед.); б — полетные вольтамперные характеристики

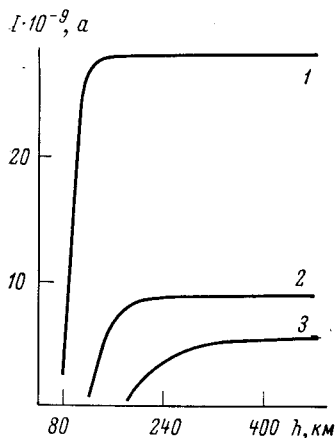


Рис. 2. Высотная зависимость фототоков анализатора для различных спектральных интервалов 20 сентября при движении ракеты вниз

1 — поглощение ультрафиолетового излучения для спектрального интервала  $\lambda > 1050 \text{ \AA}$ ; 2 — поглощение ультрафиолетового излучения для спектрального интервала  $\lambda \sim 910 \div 1050 \text{ \AA}$ ; 3 — поглощение ультрафиолетового излучения для спектрального интервала  $\lambda \sim 700 \div 910 \text{ \AA}$

относятся как 12,5 : 21 : 66,5 соответственно. На рис. 2 показано изменение этих фототоков с высотой. Видно, что поглощение ультрафиолетового излучения в области высот 100—500 км существенно различно для разных спектральных интервалов. На больших высотах в районе 450—200 км поглощается в основном спектральная область  $\sim 700\text{--}910 \text{ \AA}$  (кривая 3). Ниже 240 км начинается поглощение  $\sim 910\text{--}1050 \text{ \AA}$  (кривая 2), ниже 120 км поглощается только излучение с  $\lambda > 1050 \text{ \AA}$  (кривая 1).

По полученным данным о поглощении была оценена интегральная концентрация нейтральных частиц  $N$  в диапазоне высот  $\sim 100\text{--}450 \text{ км}$ :

$$\exp\left(-\sum_j \sigma_j N_j\right)_\lambda = \frac{\Phi_h(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)} \dots, \quad (1)$$

где  $\Phi_h(\lambda)$  — поток солнечных фотонов длины волны  $\lambda$  на высоте  $h$ ;  $\Phi_0(\lambda)$  — поток солнечных фотонов длины волны  $\lambda$  в верхней атмосфере;  $\sigma_j$  — сечение поглощения частицами  $j$ -го сорта;  $N_j$  — число частиц  $j$ -го сорта на  $1 \text{ см}^2$  в вертикальном или наклонном столбе. Как упоминалось раньше, рассматривалось поглощение не монохроматических линий излучения, а спектральных областей. Однако использование в данном случае выражения (1), справедливого для поглощения монохроматического излучения, вполне оправдано, так как для  $\lambda < 950 \text{ \AA}$  квантовый выход платины не зависит от длины волны, а для области  $\lambda \approx 1100 \div 950 \text{ \AA}$  среднее значение квантового выхода отличается от максимального и минимального не более, чем в  $\sim 1,2$  раза [6].

При оценке концентрации нейтральных частиц рассматривалась трехкомпонентная модель атмосферы, т. е. предполагалось, что основными составляющими верхней атмосферы, обусловившими поглощение ультрафиолетового излучения, являются атомарный кислород, молекулярный кислород и молекулярный азот. При выборе значений сечений поглощения для  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  были использованы данные работ [7, 8], а также работы [9], где в свою очередь систематизировались результаты экспериментов ряда авторов. Для атомарного кислорода использовались теоретические расчеты [10]. Поскольку в данном случае плотность определялась по поглощению указанных спектральных поддиапазонов, а не отдельных монохроматических линий, для которых сечение поглощения могло бы быть выбрано более или менее однозначно, приходилось выбирать для каждого рассматриваемого спектрального поддиапазона некие «эффективные» значения сечений поглощения  $\sigma_s$  и ионизации  $\sigma_s^i$  атмосферных составляющих. При этом, очевидно, точность вычисления концентрации нейтральных частиц  $N$  в основном определяется точностью выбора этого эффективного сечения поглощения. Проведенные оценки показали, что из-за неоп-

ределенности выбора  $\sigma_0$ , максимальная ошибка в определении  $N$  не превышает для  $O_2$  и  $N_2$  фактора 2—3, а для атомарного кислорода она составляет ~20%. Для  $N_2$  и  $O_2$  эффективное сечение поглощения представлено в виде  $\sigma_0 = \sum_j \sigma_{j\infty\lambda} / \sum_\lambda J_{\infty\lambda}$ , где  $\sigma_\lambda$  — сечение поглощения рас-

считываемого компонента для излучения с длиной волны  $\lambda$ ;  $J_{\infty\lambda}$  — интенсивность солнечного излучения с длиной волны  $\lambda$  в верхней атмосфере. Максимальные и минимальные значения  $\sigma_0$  в пределах рассматриваемых спектральных поддиапазонов отличаются не более, чем в 2—3 раза, а для атомарного кислорода — не более, чем на 20%<sup>2</sup>.

Поскольку, как видно из рис. 2, для высот больше 120 км имело место поглощение только в двух спектральных поддиапазонах, для этих высот можно было определять концентрацию только двух компонент нейтральной атмосферы. Поэтому нейтральные молекулы  $N_2$  и  $O_2$  рассматривались как одна компонента с эффективным сечением  $\sigma_0 = \sum_j \sigma_j n_j / n$ , где  $\sigma_j$  —

эффективное сечение поглощения  $j$ -й компоненты в рассматриваемом спектральном интервале;  $n_j$  — концентрация  $j$ -й компоненты в  $1 \text{ см}^3$ ,  $n = n(O_2) + n(N_2)$ . Согласно имеющимся сведениям о составе нейтральных компонент, соотношение концентраций  $N_2$  и  $O_2$  отмечается на высотах 120—300 км приблизительно от 4 до 10 [9, 12]; эффективное сечение поглощения для суммы  $N_2$  и  $O_2$  при этом меняется не более чем на 10%. Таким образом, суммарная концентрация  $N_2$  и  $O_2$  определяется сравнительно хорошо.

Все расчеты проводились для плоской модели атмосферы, где изменение отношения высоты к расстоянию по лучу равно косинусу зенитного расстояния. Известно, что последнее предположение не совсем верно для больших зенитных расстояний Солнца ( $z_\odot > 75^\circ$ ), имеющих место в описываемых экспериментах. Однако ошибки, вносимые косинусоидальным приближением, меньше ошибок, вносимых как при оценке значений соответствующих эффективных сечений поглощения, так и при определении абсолютных значений, осредненных по спектру солнечных потоков. Таким образом,  $n = dN/dh \cos z_\odot$  ( $n$  — число частиц в  $1 \text{ см}^3$ ).

Из рис. 2 видно, что для высот больше ~250 км имело место поглощение только в одном спектральном интервале. Поэтому для этого уровня определялась суммарная концентрация основных атмосферных составляющих  $O + O_2 + N_2$ . На рис. 3 показаны высотные зависимости концентраций  $O_2 + N_2$  (кривая 1),  $O$  (кривая 2) и  $O + O_2 + N_2$  (кривая 3), вычисленные для 20 сентября при движении ракеты вниз. Здесь же для сравнения штриховой линией показана высотная зависимость концентрации атомарного кислорода, полученная по результатам измерения поглощения ультрафиолетового излучения Солнца при помощи спектральных приборов [9].

Зная изменение концентрации нейтральных частиц с высотой и аппроксимируя отдельные участки этого высотного распределения экспонентой, можно определить изменение высот однородной атмосферы  $H$  с высотой. Оценив затем для выбранного химического состава среднюю массу нейтральных частиц  $m$ , можно определить их температуру  $T_g$ . На рис. 4 показаны значения  $T_g$ , полученные для 20 сентября и 1 октября; ошибка в определении  $T_g$  составляет  $\pm 100^\circ \text{ К}$ . Из рисунка видно, что в пределах этой точности значения  $T_g$  для подъема и спуска ракет совпадают; на высотах 200—300 км температура возрастает от ~600 до ~1100° К, выше 300 км атмосфера практически изотермична.

Как говорилось выше, фототоки, обусловленные излучением спектральных областей ~700—910, ~910—1050 и >1050 Å, вблизи вершины

<sup>2</sup> При оценке использовались данные о распределении спектральной интенсивности в солнечном спектре [9, 11].

траектории ракеты относятся как 12,5 : 21 : 66,5. Используя известные значения квантового выхода платины [6] и пренебрегая поглощением ультрафиолета на больших высотах, были определены абсолютные значения потоков солнечных фотонов  $\Phi$  для указанных трех спектральных поддиапазонов: 0,6; 1,0 и 2,6 эрг·см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>. Проведенные лабораторные измерения показали, что неопределенность абсолютных значений квантового выхода различных образцов платины не превышает фактора 2. Сравнение полученных значений потоков с результатами спектральных измерений работ [9, 11] показало, что они совпадают в пределах фактора 1,5, т. е. по существу в пределах неопределенности квантового выхода платины.

По результатам измерений поглощения коротковолнового солнечного излучения и по вычисленным значениям  $n$  была найдена скорость ионообразования

$$q = \sum_{\Delta\lambda} \left( \sum_j \sigma_j^i n_j \right) \Phi_{0\Delta\lambda} \exp \left( - \sum_j \sigma_j N_j \right) \Delta\lambda, \quad (2)$$

где  $\Phi_{0\Delta\lambda}$  — поток солнечных фотонов в верхней атмосфере для некоего спектрального интервала;  $\sigma_j^i$  — сечение ионизации частиц  $j$ -го сорта;  $n_j$  — концентрация нейтральных частиц  $j$ -го сорта.

На рис. 5 показаны зависимости  $q(h)$ , полученные для 20 сентября при спуске и 1 октября при подъеме ракеты. Штриховыми линиями показаны зависимости  $q(h)$  для спектральных областей  $\sim 700-910$  и  $\sim 910-1050$  Å. На высотах меньше 120 км значения скорости ионообразования за счет поглощения излучения с  $\lambda > 1050$  Å оказались  $\sim 10^{-3}$  см<sup>-3</sup>·сек<sup>-1</sup> и в масштабе этого рисунка не видны. Сплошной линией показана суммарная скорость ионообразования. Из рис. 5 видно, что зависимости  $q(h)$  для 20 сентября и 1 октября носят аналогичный характер. Сравнение полученных зависимостей, обусловленных поглощением солнечного излучения указанных спектральных поддиапазонов, с кривыми, полученными для

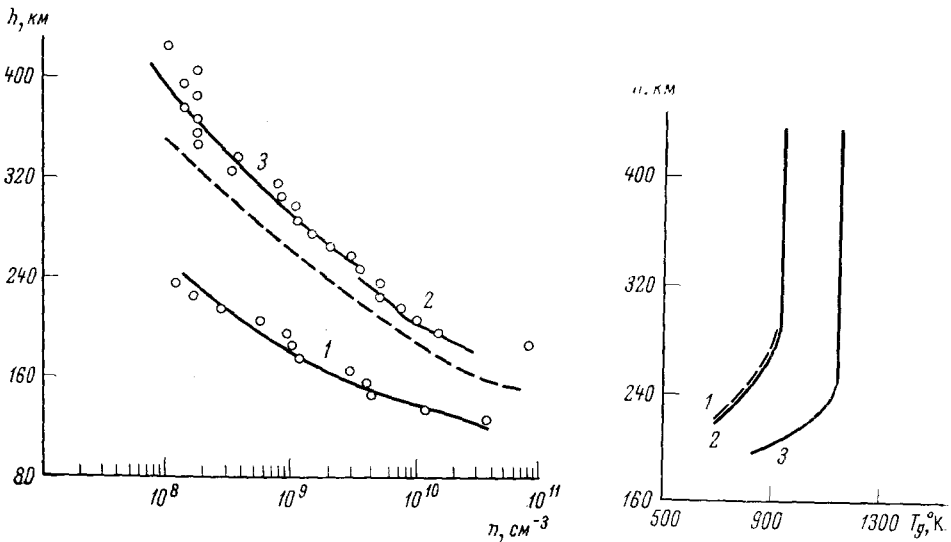


Рис. 3. Высотные зависимости концентраций нейтральных частиц  $n$   
Точки — экспериментальные значения

Рис. 4. Температура нейтральных частиц

1 — 20 сентября при движении ракеты вверх; 2 — 20 сентября при движении ракеты вниз; 3 — 1 октября при движении ракеты вверх

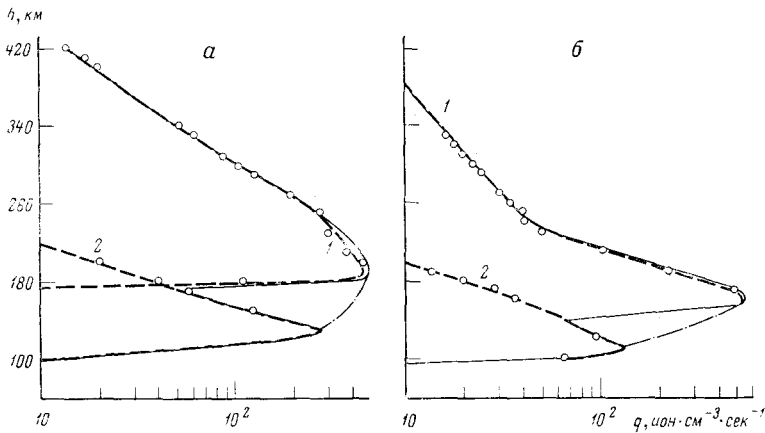


Рис. 5. Скорость ионообразования  $q(h)$  для спектральных областей  $\sim 700-900 \text{ \AA}$  (кривая 1) и  $\sim 910-1050 \text{ \AA}$  (кривая 2)

Экспериментальные значения обозначены точками; сплошная линия — суммарная зависимость  $q(h)$  для указанных спектральных областей; штрих-пунктирная — экстраполированная суммарная зависимость  $q(h)$  с учетом поглощения излучения с  $\lambda < 650 \text{ \AA}$ . а — для 20 сентября 1965 г.; б — для 1 октября 1965 г.

полного солнечного спектра [9, 13, 14], показывает, что на наших кривых имеется резкий минимум на высотах  $140-190 \text{ км}$ . Можно полагать, что этот минимум обусловлен тем, что в наших зависимостях практически не учитывается излучение с  $\lambda < 650 \text{ \AA}$ , для которого максимум ионообразования в это время суток, согласно [13], приходится как раз на указанные высоты. Полученные зависимости для рассматриваемых спектральных поддиапазонов хорошо согласуются с соответствующими расчетными зависимостями Ватанабе и Хинтереггера [13], Иванова-Холодного [14] и экспериментальными данными группы Хинтереггера, проводившей спектральные измерения до высот  $235 \text{ км}$  [9]. Сопоставление полученных значений скорости ионообразования для высот больше  $250 \text{ км}$  с теоретическими расчетами [13, 14] показывает, что на этих высотах для зенитного расстояния Солнца  $\sim 80^\circ$  основную роль в ионизации играет спектральная область  $\sim 700-910 \text{ \AA}$ , а на высотах  $100-150 \text{ км}$  —  $\sim 910-1050 \text{ \AA}$ . Излучение с  $\lambda > 1050 \text{ \AA}$  ионизует на высотах меньше  $100 \text{ км}$ .

Таким образом, анализ энергетического распределения фотоэлектронов дал сведения о спектральном поглощении ультрафиолетового излучения Солнца на высотах  $100-450 \text{ км}$ , концентрации и температуре нейтральных частиц и скорости ионообразования. Сопоставление полученных данных с результатами измерений электронной концентрации и температуры посредством других приборов, установленных на тех же ракетах, позволило вычислить ряд других ионосферных параметров [15].

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность Г. Л. Гдалевичу, В. Ф. Губскому и И. Д. Дмитриевой за помощь.

#### АБСТРАКТ

The paper describes the results of measurement of the solar ultra-violet streams by the method of delaying potentials with the analyser of photoelectrons. Data are obtained about the magnitude on integral streams in the regions of the length of waves  $\lambda \sim 700 \div 910$ ,  $\sim 910 \div 1050$ ,  $> 1050 \text{ \AA}$ . The paper also presents calculations of the concentration and temperature of neutral particles on heights  $\sim 100-400 \text{ km}$  and of the rate of ion for-

mation. It is determined that at the heights  $< 250$  km the rate of ion formation is approximately several tens of particles in  $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , which is mainly caused by the emission in the region  $\sim 700-910 \text{ \AA}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Рудаков, И. А. Кнорин. Наст. сборник, стр. 34.
2. Г. Л. Гдалевич, В. Ф. Губский. Наст. сборник, стр. 30.
3. В. В. Афонин, Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич, Б. Н. Горожанкин, К. И. Грингауз, Р. Е. Рымчинский, Н. М. Шютте. Исследование космического пространства. М., изд-во «Наука», 1965.
4. H. E. Hinteregger, K. Damon, L. Hall. *J. Geophys. Res.*, 64, 961, 1959.
5. B. N. Goroghaunkin, K. I. Gringauz, N. M. Shutte. *Space Res.*, VII, 378, 1966.
6. H. E. Hinteregger, K. Watanabe. *J. Opt. Soc. America*, 43, 604, 1953; N. Wainfan, W. Walker, G. Weissler. *J. Appl. Phys.*, 24, 1318, 1953; H. E. Hinteregger. *Phys. Rev.*, 96, 538, 1954.
7. K. Watanabe. *Advances in Geophys.*, 5, 153, 1958.
8. J. A. R. Samson, R. B. Cairns. *J. Geophys. Res.*, 69, 4583, 1964.
9. H. E. Hinteregger, L. A. Hall, G. Schmidtke. *Space Res.*, V, 1175, 1964.
10. A. Dalgarno, R. J. W. Henry, A. L. Stewart. *Planet. Space Sci.*, 12, 235, 1964.
11. H. E. Hinteregger. *Space Sci. Rev.*, 4, 461, 1965.
12. H. Kallman-Bijl, W. Sibley. *Planet. Space Sci.*, 71, 1379, 1963.
13. K. Watanabe, H. E. Hinteregger. *J. Geophys. Res.*, 67, 999, 1962.
14. Т. С. Иванов-Холодный. *Геоматнетизм и аэронавтика*, 6, 382, 1966.
15. К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич, В. А. Рудаков, Н. М. Шютте. Наст. сборник, стр. 43.