

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
КОМИССИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

(Отдельный оттиск)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1965

В. В. Безруких, К. И. Грингауз

**ВНЕШНЯЯ ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
(ОТ 2000 ДО 200 000 км)**

В настоящем докладе кратко излагается состояние сведений о внешней области ионосферы Земли, расположенной выше 2000 км. Экспериментальные данные, относящиеся к этой области ионосферы, до недавнего времени были весьма немногочисленны. Существование окружающей Землю сравнительно холодной плазмы с энергиями частиц не более единиц эв и с концентрациями, превышающими их концентрацию в межпланетной среде, было обнаружено в опытах с ловушками заряженных частиц на советских лунных ракетах в 1959 г. [1]. В 1958 г. считалось, что концентрация заряженных частиц, соответствующая условиям межпланетного пространства, имеет место уже на высотах 2000—3000 км [2]. Несмотря на то, что еще в 1953 г. Стори (Канада), изучая так называемые свистящие атмосферерики, оценил концентрацию электронов n_e на высоте 12 500 км как 10^3 см^{-3} , до полетов советских лунных ракет этот результат обычно относили не к ионосфере, а к межпланетной среде, так как до

1959 г. считалось общепринятым, что n_e в межпланетном пространстве составляет $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ [3].

В 1961 г. в [1] была опубликована кривая высотного хода концентрации заряженных частиц (рис. 1). Эта кривая строилась по результатам разновременных измерений, выполненных по различной методике.

Для построения хода концентрации заряженных частиц на высотах, до 1000 км использовались данные, полученные в 1958 г. методом дисперсионного интерферометра при пусках геофизических ракет АН СССР и

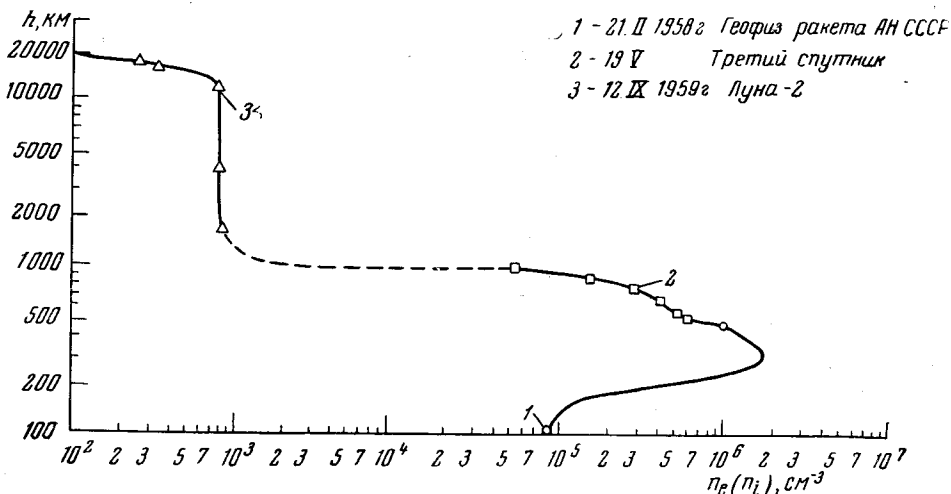


Рис. 1

при помощи сферических ионных ловушек на третьем советском спутнике [4, 5].

Значения концентраций заряженных частиц на высотах более 2000 км были получены при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете («Луна-2») [6, 7] и являлись в то время единственными экспериментальными данными, относящимися к этой области. Из кривой (см. рис. 1) видно, что в области высот от ~ 2000 до $\sim 15\,000$ км n_i составляла $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, а на высоте 20 000 км $n_i < 10^2 \text{ см}^{-3}$. В [1] указывалось, что в дальнейшем должны быть проведены многократные измерения концентрации ионов в периферийной части газовой оболочки Земли, проверена стабильность ее высоты и зависимость последней от географической широты. В интервале высот от 1000 до 2000 км в 1959 г. еще не имелось результатов измерений n_e или n_i , поэтому на рис. 1 участок кривой, соединяющий эти высоты, был проведен произвольно. При публикации рис. 1 отмечалось, что, благодаря недостаточности данных об ориентации ловушек во время полета «Луны-2», каждое из определенных значений n_i могло быть меньше истинного, например в два раза, но при этом подчеркивалось, что реальность эффекта ускоренного спада n_i в интервале высот 1500—2000 км не вызывает сомнения [1]. Вывод о том, что ионы, зарегистрированные ловушками до высот $\sim 20\,000$ км, имеют малые энергии и что обнаруженная плазма состоит из частиц, обладающих тепловыми скоростями, был сделан на основании сопоставления показаний установленных на «Луна-2» ловушек заряженных частиц с различными потенциалами на внешних сетках, отличающимися один от другого на единицы вольт.

В работе [8] на основе анализа полученных результатов был сделан вывод о том, что рассматриваемая область заполнена ионами водорода — протонами.

Перечислим кратко опыты, в которых наблюдалась периферийная часть земной ионосферы после полета «Луны-2» в 1959 г.

В 1961 г. на спутнике «Эксплорер-10» при помощи модуляционной ионной ловушки Бриджем и др. [9] наблюдалась относительно холодная стационарная плазма на геоцентрических расстояниях от 1,3 до 2,9 R_3 , что соответствует высотам над Землей от ~ 2000 до ~ 12500 км.

В 1962 г. измерения концентрации ионов в периферийной области ионосферы были проведены на высоких широтах во время полета станции

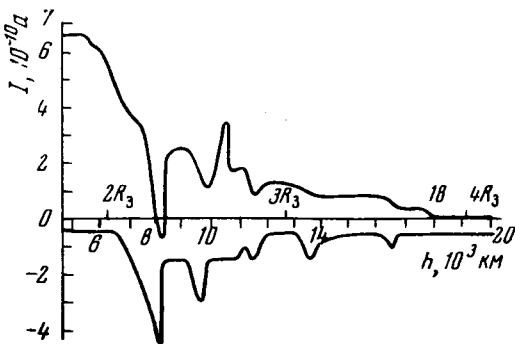


Рис. 2

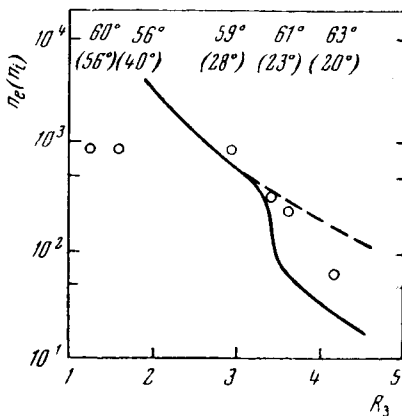


Рис. 3

«Марс-1» [10]. Вплоть до высот 18000 км ловушка с нулевым потенциалом на внешней сетке регистрировала положительный ток, в то время как в ловушке с потенциалом $+50$ в на внешней сетке протекал ток отрицательный (рис. 2). Эти измерения также свидетельствуют о том, что Земля окружена ионизированной газовой оболочкой до высот ~ 18000 км.

В 1963 г. Карпентер (США) опубликовал свои результаты наблюдений за распространением свистящих атмосфериков [11]. Он обнаружил резкий спад электронной концентрации в экваториальных широтах на геоцентрических расстояниях 3—4 R_3 . По мнению Карпентера, этот спад, названный им «эффектом колена», характеризуется уменьшением электронной концентрации не менее чем в шесть раз (рис. 3). Карпентер подчеркивает, что «эффект колена» — явление постоянное, хотя может наблюдаться на различных расстояниях в связи с изменением магнитной активности. По его наблюдениям, расположение «колена» менялось от 3 R_3 при $K_p = 6$ до 4,5—7 R_3 в особо магнитно-спокойных условиях. В работе Карпентера отмечалась также связь найденного им «эффекта колена» и результатов опытов с ловушками на «Луна-2» (результаты, полученные при помощи «Луны-2», показаны на рис. 3 кружками).

Заметим, что в 1964 г. исследования «колена» в экваториальных профилях Карпентером были продолжены и значительно расширены. Реальность эффекта «колена» полностью подтверждена многочисленными наблюдениями. Прделана значительная работа по изучению изменений высоты «колена» со временем суток и в связи с геомагнитными возмущениями. К сожалению, мы располагаем лишь тезисами докладов Карпентера и др. [12, 13]. Полностью же тексты докладов еще не опубликованы.

В конце 1963 г. аналогичный эффект был обнаружен Сербу (США) на спутнике «ИМП-1» («Эксплорер-18») [14]. При наблюдениях потоков электронов с малыми энергиями ($E < 5$ эв) при помощи трехэлектродной ловушки заряженных частиц вблизи Земли обнаружено резкое уменьшение регистрируемых потоков (N) на геоцентрических расстояниях $\sim 2,2$ —4 R_3 (рис. 4). Особенности методики опыта Сербу (в частности,

наличие большого засасывающего электроны положительного потенциала на внешней сетке ловушки) не позволили ему пересчитать зарегистрированные потоки в концентрации электронов. Однако не подлежит сомнению, что эффект спада величин потоков на указанных выше расстояниях является тем же эффектом, который наблюдался по ионной компоненте околоземной плазмы на «Луне-2», а также по электронной компоненте в измерениях Карпентера. На спутнике «Электрон-2» в числе других научных приборов имелась

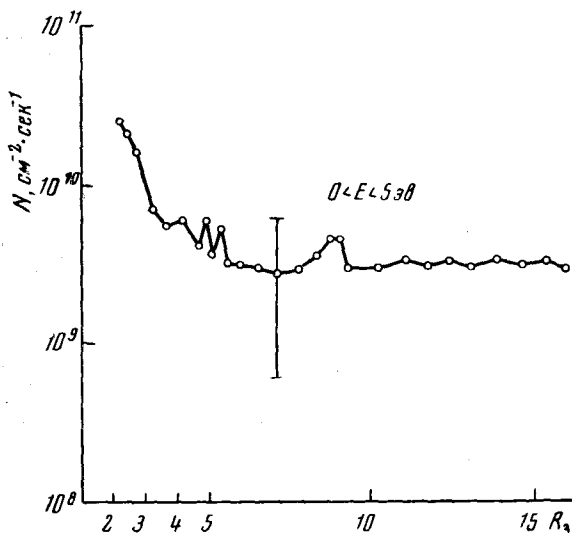


Рис. 4

Потенциал внешней сетки ловушки был равен потенциалу корпуса спутника. В связи с этим ловушка могла регистрировать положительные ионы всех энергий, превышающих потенциал спутника относительно окружающей среды.

Трехэлектродную ловушку с постоянными потенциалами на электродах в настоящее время следует считать весьма грубым прибором по сравнению с ловушками с меняющимися потенциалами на электродах. Тем не менее, поскольку результаты этого опыта сопоставимы с результатами, полученными ранее в 1959 г. на лунных ракетах и в 1962 г. на станции «Марс-1», благодаря одинаковой методике и в связи с тем, что измерения проводились во время большого числа оборотов «Электрона-2» вокруг Земли, они явились важным этапом изучения периферийной части ионосферы в рассматриваемом интервале высот.

На рис. 5 в качестве примера приведены измеренные 28—29.II 1964 г. величины коллекторных токов ловушки вдоль орбиты спутника. Такой характер изменений токов типичен для всех оборотов спутника. При каждом приближении его к Земле наблюдалось сравнительно резкое возрастание тока, создаваемого положительными ионами (начинающееся на высотах от $\sim 20\,000$ до $\sim 15\,000$ км), а при каждом удалении — убывание тока аналогичного типа. Эти изменения коллекторного тока подобны наблюдавшимся в 1959 г. уменьшениям токов в ловушках заряженных частиц на советских лунных ракетах при удалении их от Земли [1, 5]. Тогда, как указывалось выше, был сделан вывод, что токи в ловушках с нулевым и отрицательным потенциалами на внешних сетках создавались ионами плазменной оболочки Земли, являющейся прямым продолжением ранее известных областей ионосферы и состоящей из частиц с малыми (тепловыми) энергиями [6, 7].

Из данных измерений коллекторного тока ловушки заряженных частиц на спутнике «Электрон-2» (они имеются по нескольким десяткам

новых приборов имелась трехэлектродная ловушка заряженных частиц, подобная ловушкам, установленным на других советских космических зондах, начиная с лунников [1, 6, 10, 15].

Спутник «Электрон-2» был выведен 30.I 1964 г. на орбиту с апогеем $\approx 11.6 R_z$ (от центра Земли) под углом к плоскости экватора 61° . Высота перигея — 400 км. Одной из особенностей орбиты являлось то, что интервал высот от ~ 5000 до $\sim 24\,000$ км спутник проходил над тропическими районами Земли.

оборотов спутника) можно отчетливо видеть, что ускоренное убывание с высотой концентрации тепловых ионов в плазменной оболочке Земли (ионосфере), наблюдавшееся во время единичных измерений на лунных ракетах на высотах 15—20 тыс. км, имеет место всегда. Эти высоты находятся значительно ниже минимальной границы магнитосферы. Заметим,

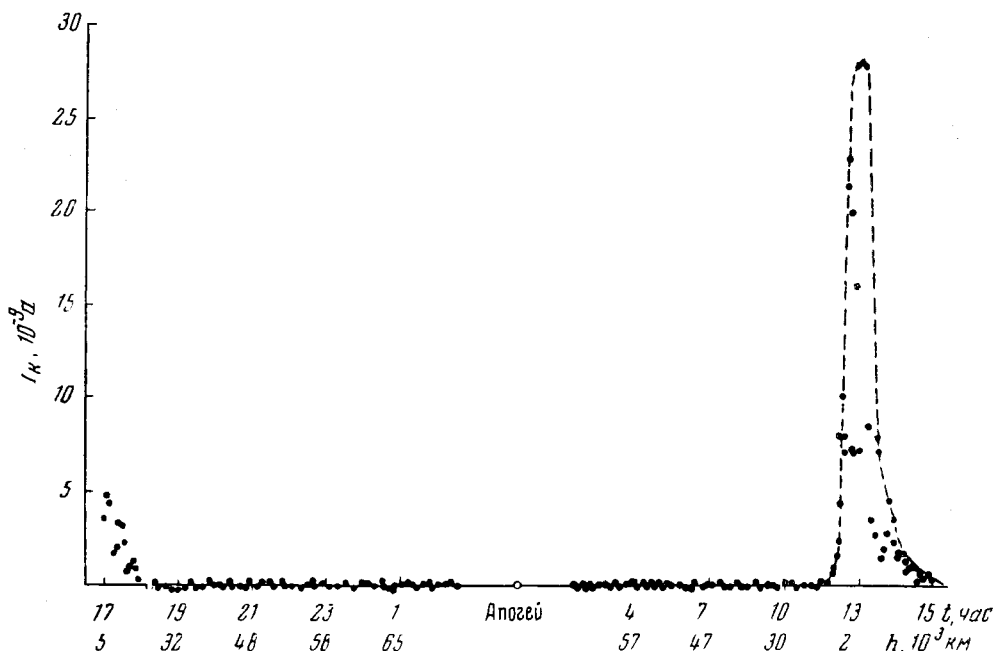


Рис. 5

что, так как значения токов, превышающие $30 \cdot 10^{-9}$ а, лежат за пределами диапазона усилителя, большие концентрации ионов, соответствующие нижней части ионосферы, в которой находится перигей спутника, не могли быть определены в этом опыте.

Оценка ионных концентраций вблизи Земли по величинам коллекторного тока ловушки проводилась, как и при обработке данных, полученных на «Луне-2» [1], при следующих основных допущениях.

1) Принималось, что из измеренных значений коллекторного тока вблизи данной высоты наибольшее значение соответствует совпадению нормали к коллектору ловушки и вектора скорости спутника. В действительности оно соответствовало лишь наибольшему приближению этих двух направлений одного к другому.

2) Влияние электрического потенциала спутника относительно окружающей плазмы на соби́рание ионов в ловушке не учитывалось. Разумность этого допущения на высотах до $\sim 3 R_z$ подтверждается измерениями Сербу, согласно которым этот потенциал на указанных высотах близок к нулю [14]. Важно отметить, что в период с 31.I по 13.II 1964 г. при удалении спутника от Земли участок орбиты, соответствующий высотам от ~ 3000 до $\sim 10\,000$ км, не был освещен Солнцем, т. е. фотоэффект с поверхности спутника на этих высотах отсутствовал, и электрический потенциал спутника относительно окружающей плазмы заведомо не мог быть положительным. Кроме того, как уже отмечалось в [1], ионный ток в ловушке, которая нормальна к вектору скорости спутника, наименее чувствителен к величине потенциала спутника.

На рис. 6 приведен ряд значений n_i , полученных во время семи проходов спутника вблизи Земли, даты которых указаны на рисунке.

(Значения n_i , обведенные кружком, соответствуют измерениям во время нахождения спутника в земной тени.) Эти данные приводят к следующим выводам:

1) Как это было указано в [1, 7], толщина области ионосферы, в которой концентрация заряженных частиц более чем 10^2 см^{-3} , достигает 15 000—20 000 км.

2) Высотное распределение n_i внутри этой области заметно отличается от приведенного в [1]. Если на высотах до $\sim 10\,000 \text{ км}$ высотный ход n_i на рис. 6 весьма схож с распределением, приведенным в [1] (см. рис. 1), то величины n_i , относящиеся к высотам от 2000 до 10 000 км, в несколько раз превышают значения, соответствующие тем же высотам на рис. 1. Новые данные n_i значительно лучше согласуются с результатами различных прямых измерений высотных распределений электронов и ионов, проведенных после 1960 г. на высотах от 1000 до 2000 км (в том числе с измерениями, проведенными при помощи ионных ловушек на спутнике «Космос-2» в 1962 г., согласно которым на высотах $\sim 1500 \text{ км}$ n_i составляет несколько единиц на 10^4 см^3 [16]).

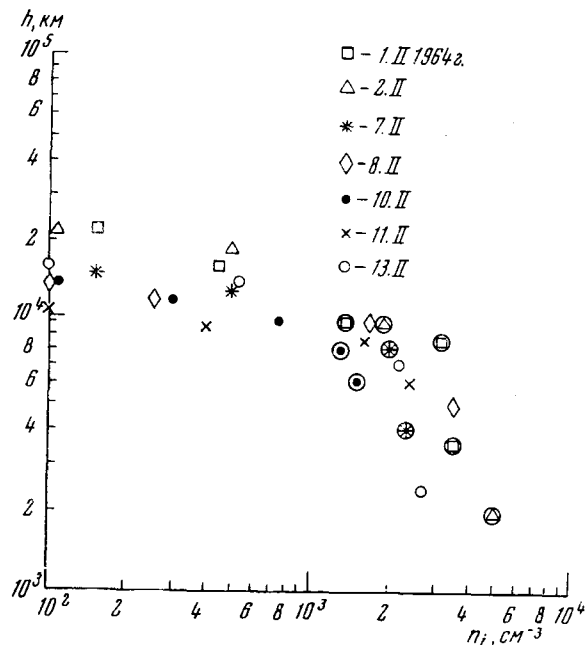


Рис. 6

Следует также заметить, что высотные распределения полной концентрации $n_i(h)$, полученные на «Электроне-2» в области высот ниже 10 000 км, значительно лучше согласуются с высотным распределением электронной концентрации $n_i(h)$, полученным Карпентером по данным свистящих атмосфериков (см. рис. 3).

Мы уже указывали, в публикациях, относящихся к результатам измерений n_i на лунных ракетах 1959 г., где отмечалось, что найденные величины n_i могут быть меньше истинных (например, в два раза), однако там же отмечалась несомненная реальность эффекта ускоренного падения n_i с высотой при $h \gtrsim 15\,000 \text{ км}$.

В связи с расхождением результатов определений n_i на лунных ракетах и на «Электроне-2» нами были вновь рассмотрены первичные результаты измерений вблизи Земли при помощи ловушек заряженных частиц в 1959 г. При этом было найдено, что, помимо неточного знания ориентации ловушек, на уменьшение значений n_i по сравнению с истинными величинами в области высот ниже 10 000 км мог повлиять эффект ограничения коллекторного тока в бортовом усилителе тока. Однозначно установить, повлиял ли этот неучтенный ранее эффект на результаты, нельзя.

Следует, однако, при сравнении результатов лунных ракет и «Электрона-2» иметь в виду следующее. Обаяши [17], анализируя результаты, полученные Карпентером [11] и при помощи лунных ракет [1], высказал предположение, что возможной причиной расхождения высотных зависимостей, представленных в [1] и [11], может быть то обстоятельство, что измерения проводились над районами с различной широтой. Имеется ос-

нованне считать, что высотное распределение температуры существенно зависит от геомагнитной широты. Благодаря существенно анизотропному характеру теплопроводности магнитосферы и высокой температуре на границе магнитосферы и солнечного ветра, в рассматриваемой в настоящем докладе области высот на высоких широтах температура может быть значительно выше, чем в экваториальных широтах. Это может вызвать различие и в высотном ходе n_i . Распределение n_i , опубликованное по данным «Луны-2» (отличающееся меньшими изменениями n_i на высотах 2000—10 000 км), может быть типичным для высоких широт. Эти соображения Обаяши, относящиеся к различию данных «Луны-3» и Карпентера, могут быть вполне применимы к различию данных «Луны-2» и «Электрона-2», так как последние, как уже отмечалось, также относятся к низким широтам.

Окончательно выяснение причин различия профилей $n_i(h)$, полученных на «Луне-2» и на «Электроне-2», последует только после проведения новых аналогичных ракетных измерений в периферийной области высокоширотной ионосферы.

Относительно природы плазменной оболочки Земли, являющейся периферийной областью земной ионосферы, можно сказать следующее. Молекулы воды, попадающие в верхнюю атмосферу в результате испарения Мирового океана, диссоциируют под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Образовавшиеся при этом атомы водорода ионизируются в результате перезарядки с ионами атомарного кислорода в реакции $H + O^+ \rightleftharpoons H^+ + O$, которая интенсивно осуществляется в области, где соударения частиц еще достаточно часты, т. е. вплоть до основания экзосферы, расположенной в зависимости от фазы солнечной активности на высотах от ~ 500 до ~ 1000 км.

От основания экзосферы ионы водорода — протоны — транспортируются вверх в результате диффузии вдоль силовых трубок геомагнитного поля [18].

Представляет интерес вопрос о том, какова степень ионизации в рассматриваемой нами области ионосферы. В. Г. Курт в 1964 г. по данным измерений рассеянного нейтральным водородом излучения L_α ($\lambda = 1215 \text{ \AA}$), произведенных при полете станции «Зонд-1», оценил концентрации атомов нейтрального водорода в околоземном пространстве [19]. Некоторые полученные им цифры приведены ниже:

R_3	H , км	n_0 , см ⁻³
1,25	1 600	$7,0 \cdot 10^2$
1,5	3 200	$3,6 \cdot 10^2$
2,0	6 400	$3,1 \cdot 10^2$
3,0	13 000	$8,5 \cdot 10^1$
4,0	20 000	$5,1 \cdot 10^1$

Здесь R_3 — геоцентрические расстояния в радиусах Земли; n_0 — концентрация атомов нейтрального водорода; H — расстояния от поверхности Земли.

Сопоставляя эти данные с графиком рис. 1, легко видеть, что на рассматриваемых в нашем докладе высотах земная атмосфера почти полностью ионизирована и концентрация нейтральных частиц составляет лишь малую долю от концентрации ионов, причем эта доля уменьшается по мере увеличения высоты.

В заключение нам хотелось бы обратить внимание на то, что, помимо большого научного интереса, изучение периферийной области ионосферы представляет и инженерный интерес для космонавтики. При приближении к Земле обитаемых межпланетных кораблей, по-видимому, желательно ориентировать корабль по вектору скорости. Весьма перспективными датчиками для системы подобной ориентации являются приборы,

регистрирующие ионный ток, величина которого зависит от ориентации входного отверстия прибора относительно вектора скорости космического аппарата (так как использование датчиков ориентации, реагирующих на потоки нейтральных частиц, исключено в связи с тем, что, как уже указывалось в докладе, нейтральная компонента атмосферы на расстояниях порядка тыс. км от Земли составляет лишь малую долю от ионизированной компоненты).

Изучение периферийной области ионосферы позволяет определить размеры зоны, окружающей Землю, в которой возможна ориентация космического корабля по ионным датчикам.

Литература

1. K. I. Gringauz. *Space Res.*, **1**, 539, 1962.
2. Я. Л. Альперт, Э. Ф. Чудесенко, Б. С. Шапиро. В сб. «Предварительные итоги научных исследований с помощью первых советских искусственных спутников Земли и ракет», № 1. Изд-во АН СССР, стр. 40.
3. A. Behr, M. Siedentopf. *Zs. Astrophys.*, **32**, N 1, 19, 1953.
4. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961.
5. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 48.
6. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Докл. АН СССР, **131**, 1301, 1960.
7. К. И. Грингауз, В. Г. Курт и др. Докл. АН СССР, **132**, 1062, 1960.
8. К. И. Грингауз, В. Г. Курт и др. *Астр. ж.*, **37**, 716, 1960.
9. H. S. Bridge et al. Direct observations of the interplanetary plasma. Доклад на симпозиуме в Киото (Япония), 1962.
10. K. I. Gringauz et al. *Space Res.*, **4**, 621, 1964.
11. D. L. Carpenter. Докл. на XIV Генеральной Ассамблее УРСИ (Токио), 1963.
12. J. J. Angerami, D. L. Carpenter. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **46**, N 1, 190, 1965.
13. D. L. Carpenter, T. R. Jewell. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **46**, № 1, 190, 1965.
14. G. P. Serbu. *Space Res.*, **5**, 564, 1965.
15. K. I. Gringauz et al. *Space Res.*, **3**, 602, 1963.
16. К. И. Грингауз, Б. Н. Горюжанкин и др. Докл. АН СССР, **151**, 560, 1963.
17. T. Obajashi. The Report on ionosphere and space research in Japan, **28**, N 3, 228, 1964.
18. W. V. Hanson, J. V. Ortenburger. *J. Geophys. Res.*, **66**, 5, 1425, 1961.
19. В. Г. Курт. Доклад на XV Конгрессе Международной Астронавтической Федерации. Варшава, 1964.