

Отдельный оттиск

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
КОМИССИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

ТРУДЫ ВСЕСОЮЗНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФИЗИКЕ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Москва 10-16 июня 1965 г.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Москва 1965

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
ПРИ ПОМОЩИ РАКЕТ И СПУТНИКОВ В 1960—1964 гг.

Наш доклад является кратким обзором, в котором рассматриваются измерения электронной и ионной концентрации в ионосфере до высот примерно 2000 км. Цель доклада заключается не столько в сообщении конкретных результатов различных экспериментов, сколько в выявлении методических тенденций в развитии подобных измерений. Это вызвано в основном недостатком времени, отведенного для доклада. Кроме того, именно концентрация заряженных частиц является одним из важнейших параметров ионосферы, определяющим, в частности, законы распространения в ней радиоволн.

Мы имеем в виду также, что измерениям температуры, ионного состава и исследованиям периферийной области ионосферы посвящены специальные доклады (см., например, [1]).

Недостаток времени заставил также ограничиться показом без детального обсуждения лишь наиболее важных с нашей точки зрения результатов измерений.

Многочисленные методы измерений n_e и n_i можно разделить на две основные группы:

1) измерения параметров ионосферы по показаниям приборов, реагирующих на свойства среды в непосредственной окрестности чувствительного элемента, — зондовые методы;

2) измерения при помощи радиоволн, излучаемых или принимаемых на летящем объекте и распространяющихся на значительные расстояния, — радиометоды.

Часть этих методов является приспособлением для новых задач известных ранее способов исследования распространения радиоволн и лабораторных исследований плазмы; некоторые же методы были разработаны специально для исследования верхней атмосферы при помощи ракет и спутников.

При постановке каждого эксперимента необходимо было учитывать не только возможности, предоставляемые ракетами и спутниками, но и ограничения, налагаемые свойствами среды, характером движения объектов, трудностями передачи информации и др. В настоящее время как радиометоды, так и зондовые методы применяются и на ракетах, и на спутниках.

1. Ракетные измерения

Начнем обзор с исследований ионосферы при помощи ракет. В табл. 1 приведены сведения о некоторых вертикальных запусках ракет за рубежом (в период 1960—1964 гг.), во время которых проводились исследования ионосферы [2—10]. Измерявшиеся параметры указаны соответствующими индексами, буквы З и Р указывают, каким методом осуществлялись измерения (З — зондовые, Р — радиометоды).

К радиометодам, которые первыми были применены для измерения n_e при пусках исследовательских ракет и в США, и в СССР, относятся наиболее широко используемые сейчас метод дисперсионного интерферометра, метод наблюдения эффекта Фарадея, а также метод импульсного радиозондирования ионосферы сверху. Эти методы позволяют непосредственно определять лишь электронную концентрацию, а результаты измерений характеризуют значительно большие области исследуемой среды, чем результаты зондовых измерений, что связано с особенностями распростра-

нения радиоволн. При измерениях, использующих проходящие через ионосферу радиоволны, области усреднения измеряются десятками метров, а в некоторых случаях (при измерениях при помощи эффекта Фарадея) — километрами. На радиоизмерениях локальных параметров ионосферы в

Таблица 1
Сведения о некоторых ионосферных ракетных экспериментах США

Дата	Максимальная высота исследованной области, км	Измерявшиеся параметры	Метод измерения
12.IV 1961	1900	n_i, T_i	З
27.IV	620	n_e	Р
24.VI	1000	n_e	Р
19.X	1600	n_e	Р
29.III 1962	2800	n_e, n_i	З, Р
30.IV	240	n_e, n_i	З, Р
2.VII 1963	850	n_e, T_e	З, Р
30.VI	5500	n_e	З
28.IX	900	n_e, T_e	З, Р
7.X 1964	1000	n_i, m_i	З
7.X	1000	n_i, m_i	З

той или иной степени сказываются свойства среды на всем пути распространения радиоволн.

Тем не менее, благодаря высокой достоверности данных, получаемых радиометодами при помощи вертикально запускаемых ракет, эти методы

Таблица 2
Таблица зарубежных запусков ракет для исследования ионосферы

Год	Страна	Количество запусков	Максимальная достигнутая высота, км
1960	США	9	670
	Япония	2	190
1961	США	14	6000
	Япония	5	350
1962	США	8	6000
	Англия	5	250
1963	США	14	11000
	Англия	7	250

были и остаются наиболее надежным и точным средством определения высотного хода n_e в ионосфере.

Зондовые измерения (к которым, в частности, относятся и измерения при помощи ионных ловушек) позволяют определять локальные концентрации заряженных частиц и результаты их не зависят от состояния среды между ракетой и Землей. Однако зондовые измерения связаны со значительными трудностями, ибо на их результаты влияют такие факто-

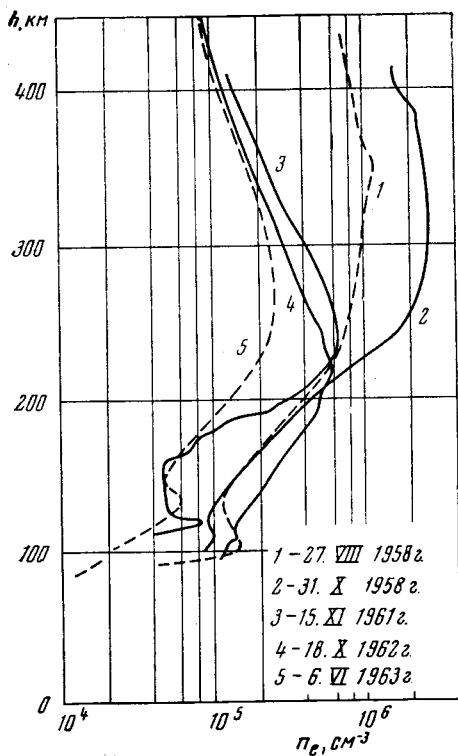


Рис. 1

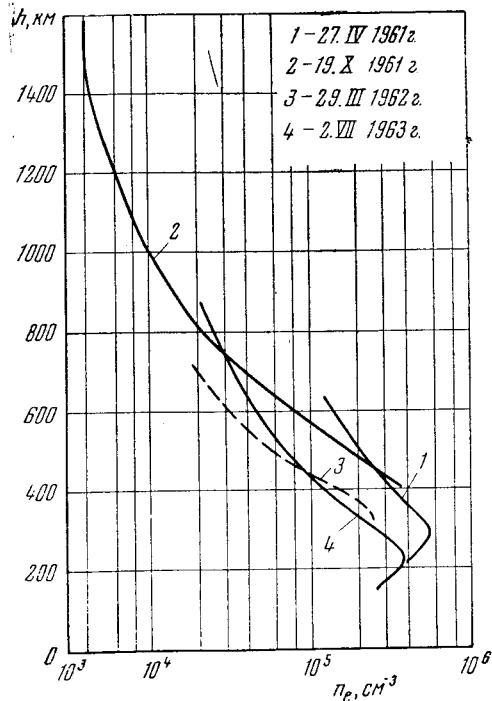


Рис. 2

ры, как объемный заряд, окружающий летящую ракету, десорбция газов с поверхности ракеты, фото- и вторичная эмиссия, а при измерении электронной концентрации — ориентация датчика относительно вектора геомагнитного поля.

При сравнительно малых скоростях вертикально летящих ракет (во всяком случае, в верхних частях их траекторий) на определения концентрации положительных ионов существенно влияют тепловые скорости ионов, поэтому для интерпретации результатов необходимо знать ионную температуру и массовый состав ионов.

Все это делает зондовые измерения на ракетах сложными, требующими весьма тщательной подготовки опытов и, как правило, трудоемкой обработки их результатов.

Перейдем к результатам ракетных экспериментов. На рис. 1 приведены распределения электронной концентрации по высоте ($n_e(h)$ -профили), полученные методом дисперсионного радиоинтерферометра при пусках геофизических ракет АН СССР. Сплошные кривые относятся к пускам в дневное время, а пунктирные — в утреннее время. Две кривые 1958 г. приведены для сравнения, поскольку они получены тем же методом [11, 12].

Сравнение относящихся к разным годам кривых (см. рис. 1) позволяет отметить, что в годы, близкие к минимуму солнечной активности, главный максимум ионизации в несколько раз меньше по величине и расположен по высоте на 50—100 км ниже по сравнению с годом, близким к максимуму солнечной активности. Обращает на себя внимание согласный ход кривых, относящихся к пониженной солнечной активности (1961—1963 гг.), причем убывание электронной концентрации над максимумом области F в 1961—1963 гг. происходило значительно быстрее, чем в 1958 г.

Эти выводы, вытекающие из сравнения $n_e(h)$ -профилей, показанных на рис. 1, согласуются с экспериментальными данными, относящимися к ионной концентрации, свидетельствующими о том, что с уменьшением солнечной активности во время 11-летнего цикла концентрация в ионосфере существенно уменьшается и над максимумом области F убывание n_i с ростом высоты происходит быстрее. Такие сведения были получены при помощи ионных ловушек, установленных на спутнике «Космос-2» (см. раздел II).

На рис. 2 изображены $n_e(h)$ -профили, измеренные аналогичным образом при пусках ракет США [3, 5, 6, 8]. Отметим, что из-за радиопомех на одной из двух частот интерферометра кривая 29.III 1962 г. получена по наблюдениям эффекта Фарадея. Кривые рис. 2 на сопоставимых участках достаточно близки одна к другой, однако нельзя не отметить заметного различия в наклонах этих кривых. В общем кривые рис. 1 и 2 имеют одинаковый характер, а измеренные на равных высотах (в 1960—1963 гг.) значения n_e близки одно к другому.

Во время пусков ракет проводились также измерения высотных распределений заряженных частиц при помощи различных зондовых методов. В качестве примера подобных измерений на рис. 3 представлены два распределения $n_i(h)$, полученные в США при помощи ионных ловушек (сплошная кривая — [2], точки — [6]). Оба распределения относятся к ночному времени (около полуночи); различие в ходе кривых может объясняться, с одной стороны, различным состоянием ионосферы во время экспериментов; с другой стороны, это расхождение, возможно, является результатом погрешностей, вносимых в зондовые измерения различными факторами, о которых говорилось ранее.

Размах ионосферных исследований при помощи ракет в настоящее время велик, что иллюстрируется табл. 2, содержащей неполные данные о пусках ракет в некоторых странах [13—15]. По программе МГСС (1964—1965 гг.) для ионосферных исследований должны производиться пуски ракет в 15 пунктах десяти стран [16]. Учитывая важность исследований при помощи вертикально запускаемых ракет и с целью проведения этих исследований по единой методике, Международный комитет по космическим исследованиям (COSPAR) выпустил руководство с описанием рекомендуемых методов измерений и соответствующих приборов [17].

II. Измерения при помощи спутников

Говоря об измерениях на спутниках, необходимо иметь в виду, что локальные измерения в этом случае не дают истинных вертикальных разрезов ионосферы вследствие наличия горизонтальной компоненты скорости спутника, в большинстве случаев значительно превышающей вертикальную. Это приводит к тому, что на измерения высотных распределений параметров ионосферы сильно влияют горизонтальные градиенты, что связано как с неоднородной структурой ионосферы, так и с быстрым изменением широты и местного солнечного времени вдоль орбиты спутника.

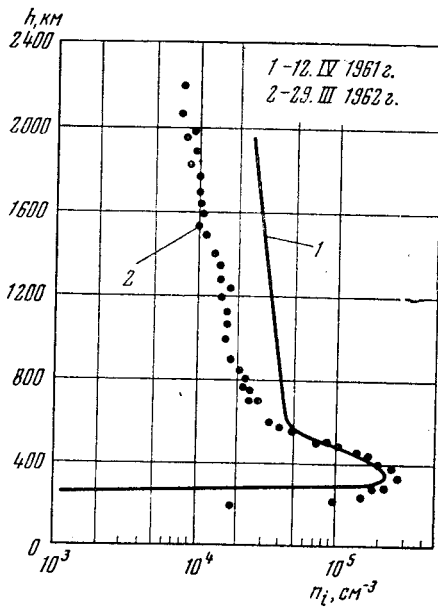


Рис. 3

борту спутника не было запоминающего устройства. Прием информации со спутника мог осуществляться только в режиме непосредственной передачи специальными приемными станциями в ограниченном числе пунктов.

25 августа 1964 г. в США запущен еще один спутник для зондирования ионосферы сверху — «Эксплорер-20». Импульсное зондирование с этого спутника осуществляется на шести фиксированных частотах в том же диапазоне.

Как уже отмечалось, общим ограничением прямых измерений параметров окружающей среды на спутниках является трудность разделения

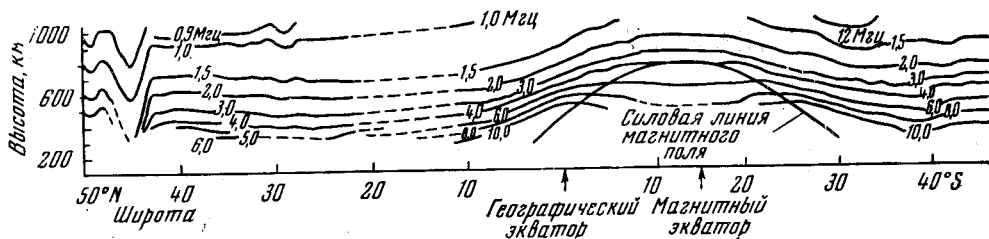


Рис. 6

вертикальных и горизонтальных изменений измеряемых величин (т. е. трудность получения высотного профиля). При использовании «летающих ионосферных станций» (типа «Алуэт») принципиально возможно получить вертикальный разрез электронной концентрации выше максимума области F в любой точке орбиты спутника. Однако надо иметь в виду, что получаемые таким способом значения n_e являются средними для сравнительно больших областей. Так, например, при радиозондировании со спутника, летящего на высоте порядка 100 км над исследуемым слоем, измеряемая электронная концентрация является усредненной по области с линейными размерами в горизонтальной плоскости порядка нескольких километров.

В качестве примера на рис. 5 изображены $n_e(h)$ -профили для экватора, полученные по данным, принятым в Сингапуре со спутника «Алуэт» [25]. Эти кривые показывают возможности радиозондирования сверху (кривая 3 — дневная, кривые 1 и 2 — утренние).

Одним из интересных результатов, полученных на спутнике «Алуэт» (29.X 1962 г.), являются частые наблюдения областей с очень большими горизонтальными градиентами на всех исследованных высотах (см. рис. 6, на котором показаны изолинии частот отраженного сигнала). Кроме того, обнаружены области несколько повышенной электронной концентрации, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля [26].

Лишь около 5% высотно-частотных характеристик, получаемых при помощи спутника «Алуэт», обрабатывается из-за их обилия и трудоемкости обработки. Заметим, что полученные при помощи спутника «Алуэт» высотно-частотные характеристики поступают в Мировой Центр А в Нью-Йорке, откуда они могут быть получены любой страной [26].

Как в СССР, так и в США (см., например, [27, 28]) проводятся исследования ионосферы при помощи излучаемых со спутников радиоволн с различными частотами; при этом обычно используется метод дисперсионного интерферометра. Этот метод применительно к спутникам рассмотрен, например, в [29, 30].

Как следует из этих работ, вычисление локальной электронной концентрации n_e по данным такого рода измерений приводит в случае использования спутников к весьма большим ошибкам.

В ряде статей (например, [31—33]) описаны опыты, проведенные фазовым методом при полетах спутников серии «Космос» и на спутнике «Электрон-1». В указанных работах содержится попытка определения локальных электронных концентраций вблизи спутника, хотя к этим измерениям полностью относятся выводы о низкой точности таких определений, сделанные в работах [29, 30]. Нельзя не обратить внимания и на тот факт, что приводимые в работах [31—33] максимумы n_e , расположенные выше слоя F , не были обнаружены другими экспериментами, в которых измерялась электронная концентрация.

Заключение

Вследствие того, что ионосфера является весьма сложной, неоднородной и непостоянной во времени средой, измерения в ней, что частично отмечалось выше, встречают ряд трудностей и во всех измерениях в большей или меньшей степени имеется элемент ненадежности, связанный либо с методическими ограничениями, либо с помехами различного типа. В связи с этим весьма полезно для повышения достоверности данных сравнивать между собой экспериментальные результаты, полученные различными методами.

Для взаимного сравнения методов измерений в США было проведено несколько интересных опытов, в которых параметры ионосферы (в частности n_e) над одним и тем же пунктом определялись различными способами. Так, 18.IV 1963 г. в район прохождения ионосферного спутника «Эксплорер-17» была запущена ракета. Максимальная высота подъема $h_{\max} = 320$ км, минимальное расстояние между ракетой и спутником $\Delta r \approx 32$ км. 2.VII 1963 г. ракета поднялась до 866 км и была на расстоянии 240 км от спутника «Алуэт», а 28.IX 1963 г. такая же ракета поднялась до 1030 км. 20.IX 1964 г. ракета ($h_{\max} \approx 1000$ км) была запущена в район прохождения спутника «Эксплорер-22» ($h_{\max} \approx 1000$ км).

На рис. 7 показаны результаты таких одновременных измерений, проведенных 28.IX 1963 г. при помощи ионных ловушек (кривая 1) и дисперсионного интерферометра (кривая 2) во время пуска ракеты; при помощи радиозондирования со спутника «Алуэт» (кривая 3) и при помощи метода некогерентного рассеяния радиоволн (кривая 4) (установка Линкольновской лаборатории) [8]. Как видно из рисунка, расхождение между результатами измерений, проведенных различными указанными выше методами, весьма невелико.

Этот комплексный эксперимент убедительно показывает, что все применявшиеся в нем методы правильно отображают истинные свойства ионосферы и поэтому имеют право на существование.

В проведенных до настоящего времени опытах на вертикально запускавшихся ракетах измерения локальных значений n_e радиометодами осуществлялись до максимальной высоты примерно 1600 км, что, по нашим оценкам (произведенным для случая дисперсионного интерферометра), приближается к предельным высотам, до которых можно применять эти методы (2000—2500 км). Зондовые измерения принципиально можно применять на любых высотах; данные зондовых измерений на больших высотах приведены, в частности, в докладе [1].

В заключение целесообразно сделать некоторые существенные с нашей точки зрения выводы из изложенного выше.

Для получения высотных разрезов концентрации заряженных частиц (так же, как и других ионосферных параметров) наиболее надежным средством, дающим наиболее точные результаты, являются высотные ракеты. Именно этим объясняется их все возрастающее применение для этой цели в различных странах (в том числе в США).

Применение радиоинтерференционных методов изучения ионосферы на спутниках связано со значительными затруднениями и ограничениями по сравнению с применением их на вертикально запускаемых ракетах. Применение ионных ловушек на спутниках, наоборот, приводит к упрощению обработки экспериментальных данных и к большей надежности результатов этой обработки по сравнению с использованием ловушек на вертикальных ракетах. В настоящее время ионные ловушки устанавливаются на многих спутниках.

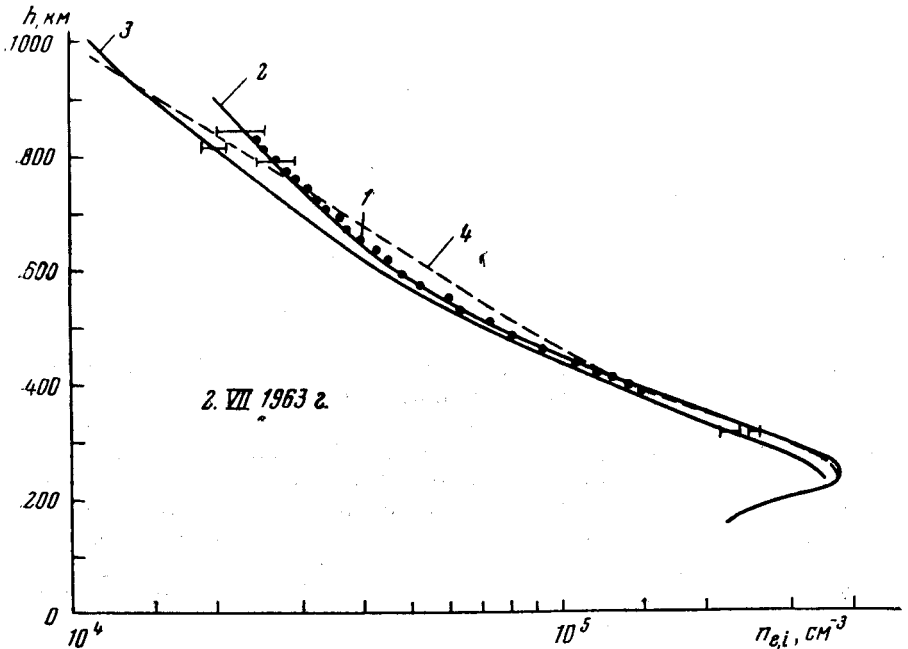


Рис. 7

Отметим некоторые важные результаты исследования концентрации заряженных частиц в ионосфере при помощи ракет и спутников.

Результаты пусков геофизических ракет АН СССР до высот ~ 500 км с 1958 по 1963 г. показали существенную зависимость высотного распределения заряженных частиц над максимумом области F от фазы солнечной активности.

Дальнейшим шагом в исследованиях ионосферы является организация импульсного радиозондирования сверху, впервые позволившего получить отчетливое представление о горизонтальных градиентах электронной концентрации. Обнаружение часто встречающихся зон с весьма значительными горизонтальными градиентами не позволяет в ряде случаев применять модель слоисто-однородной ионосферы.

Метод радиозондирования со спутника является единственным спутниковым методом, позволяющим получать высотные распределения электронной концентрации $n_e(h)$, практически свободные от влияния горизонтальных градиентов n_e .

Литература

1. В. В. Безруких, К. И. Грингауз. Наст. сборник, стр. 177.
2. R. C. Sagalin, M. Smiddy. J. Geophys. Res., 69, N 9, 1809, 1964.
3. J. E. Jackson, S. J. Bauer. J. Geophys. Res., 66, N 9, 3055, 1961.
4. R. W. Knecht, T. E. Van Zandt. J. Geophys. Res., 66, N 9, 3078, 1961.
5. S. J. Bauer, J. E. Jackson. J. Geophys. Res., 67, N 4, 1675, 1962.

Литература

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 63.
2. В. Г. Истомин. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 171.
3. К. И. Грингауз, М. Х. Зеликман. УФН, 63, вып. 16, 239, 1957.
4. К. И. Грингауз, Б. Н. Горожанкин, Н. М. Шютте, Г. Л. Гдалевич. Докл. АН СССР, 151, № 3, 560, 1963.
5. E. C. Whipple. J. Geophys. Res., 47, 2023, 1959.
6. P. Mange. J. Geophys. Res., 65, 11, 1960.
7. R. E. Bourdeau, E. C. Whipple. J. Geophys. Res., 67, 467, 1962.
8. Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич. Космические исследования, 3, № 6, 1965 (в печати).
9. P. I. Bowen, R. L. F. Boyd, C. L. Henderson, W. I. Raitt, A. P. Willmore. Proc. Roy. Soc. A, 281, 504, 1964.
10. I. I. Angerami, I. O. Thomas. J. Geophys. Res., 69, N 21, 4537, 1964.
11. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, Г. Л. Гдалевич, В. В. Афонин, Р. Ye. Rybchinsky, N. M. Shutte. Space Res., 5, 733, 1965.
12. N. M. Mott-Smith, J. Langmuir. Phys. Rev., 28, 727, 1926.
13. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, N. M. Shutte, G. L. Gdalevich. Space Res., 4, 473, 1964.
14. А. Я. Прессман, С. П. Яценко. Геомагнетизм и аэрономия, 1, № 1, 49, 1961.
15. H. E. Hinteregger, K. Damon, L. A. Hall. J. Geophys. Res., 64, 8, 961, 1959.
16. К. И. Грингауз. Space Res., 2, 539, 1961.
17. H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., 66, 2367, 1961; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., 68, 6413, 1963; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., 75, 105, 1965; H. E. Hinteregger, L. A. Hall, G. Schmidtke. Space Res., 5, 1175, 1965.
18. H. E. Hinteregger. Space. Res., 1, 304, 1960.
19. H. E. Hinteregger. Phys. Rev., 96, 538, 1954; W. Walker, G. Weissler. Phys. Rev., 97, N 4, 1178, 1955.
20. А. С. Ганесев, И. М. Израилев. ЖТФ, 31, № 3, 376, 1961; Н. Г. Находкин, П. В. Мельник. Радиотехника и электроника, 6, № 7, 1209, 1961; 7, № 2, 303, 1963; М. А. Румш и др. Физика твердого тела, 4, № 1, 69, 1962.
21. K. Norman, A. P. Willmore. Planet. Space Sci., 13, 1, 1965.