

МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ  
ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR  
SOVIET GEOPHYSICAL COMMITTEE

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ  
БЮЛЛЕТЕНЬ

GEOPHYSICAL  
BULLETIN

№ 14

*(Отдельный оттиск)*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1964

К. И. Грингауз

## ИОНОСФЕРА И ПЛАЗМА В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ СОВЕТСКИХ РАКЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во время МГГ и в следующие за ними годы в Советском Союзе были проведены исследования ионосферы и плазмы в околоземном пространстве при помощи приборов, установленных на геофизических ракетах АН СССР, спутниках Земли и космических ракетах. Полученные при этих исследованиях результаты являются свидетельством высокого темпа развития науки и познания природы человеком, характерного для нашего времени.

Эволюция представлений об ионосфере на протяжении МГГ и в последующие годы, происходившая по мере получения результатов ракетных измерений, иллюстрируется на рис. 1, где в масштабе изображены Земля и ее ионизованная газовая оболочка, как она представлялась геофизикам в 1957, 1958 и в 1960 гг. На рисунке лишь очерчены области, заполненные плазмой, окружающей Землю; о распределении концентрации заряженных частиц по высоте будет сказано ниже.

В дальнейшем я буду употреблять выражение «ионизованная газовая оболочка Земли». Это вызвано тем, что в настоящее время, по-видимому, в связи с быстрыми изменениями представлений об ионосфере не существует установившейся терминологии в этой области.

До 1957 г. считалось, что ионосфера простирается до высот 500 км; область выше 500 км, в которой соударения частиц весьма редки, называлась обычно экзосферой, верхней границей экзосферы считали высоту  $\sim 1000$  км, на которой еще наблюдались верхние участки полярных сияний. Затем в литературе появился ряд других терминов, например, было введено название «протоносфера» для области, состоящей в основном из ионов водорода; появились названия «термосфера», «геокоорона» и т. д. Я бы лично считал разумным называть ионосферой всю область, окружающую Землю, в которой имеются ионы с тепловыми скоростями и с концентрациями, отличными от концентрации ионов в межпланетном пространстве; однако во избежание недоразумений буду называть эту область ионизованной газовой оболочкой Земли (или плазменной оболочкой Земли). Целесообразно остановиться на каждом из трех отмеченных на рисунке этапов развития представлений об ионизованной газовой оболочке.

В начале 1957 г. в литературе был широко распространен график высотного хода концентрации заряженных частиц, полученный при помощи американской двухступенчатой ракеты Бернингем [1, 2]. Согласно этому графику, на высоте  $\sim 400$  км концентрация свободных электронов в ионосфере делалась ничтожно малой. Однако к этому времени была опубликована работа английского ученого Эванса [3], который определял интегральное содержание электронов в вертикальном столбе по эффекту Фарадея при радиолокации Луны на ультракоротких волнах. Эванс нашел, что общее число электронов в вертикальном столбе таково, что выше максимума слоя  $F$ , т. е. выше

300 км, общее число электронов существенно (примерно в 3 раза) превышает число электронов ниже этой высоты. Это противоречило модели ионосферы Бернинга. Таким образом, в 1957 г. вопрос был неясен.

В феврале 1958 г. была запущена геофизическая ракета АН СССР впервые на высоту 473 км. На этой ракете была установлена аппаратура для

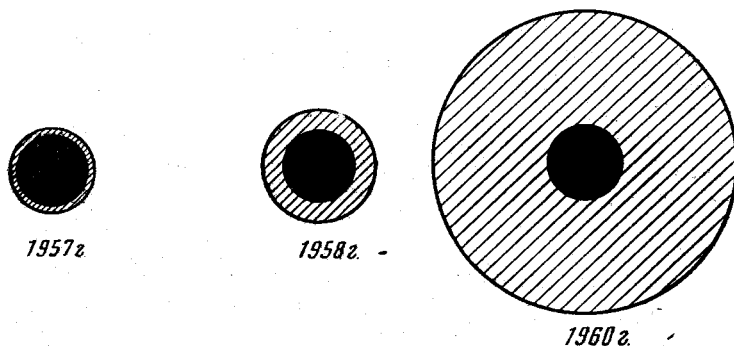


Рис. 1. Эволюция представлений об ионосфере

определения электронной концентрации при помощи измерения дисперсии когерентных ультракоротких радиоволн. Обработка данных измерений показала, что на высоте около 500 км концентрация свободных электронов была лишь сравнительно немного ниже (примерно в 2 раза), чем в максимуме слоя  $F$ , т. е. спад электронной концентрации над максимумом слоя происходил существенно медленнее, чем возрастание ее при росте высоты в области ионосферы ниже максимума. Измерения были произведены достаточно точно и надежно, высотный ход был построен по точкам, нанесенным через интервалы высоты порядка 100 м [4, 5]. Примерно в то же время в начале 1958 г. в Советском Союзе были обработаны результаты приема радиоволн, излучавшихся с первого в мире советского спутника, запущенного в октябре 1957 г., в частности так называемые радиовосходы и радиозаходы спутника [6, 7].

Обработка этих наблюдений дала для высот до 500 км то же высотное распределение электронной концентрации, которое дали опыты на геофизической ракете. Измерения Бернинга оказались неверными (впоследствии он сам нашел в них ошибку) [8]; измерения общего числа электронов в вертикальном столбе Эванса были правильными.

В мае 1958 г. было положено начало новому этапу исследования ионосферы. Ранее единственным источником сведений о свойствах ионосферы были радиоволны, излучаемые с Земли или от внеземных источников. На третьем спутнике, запущенном 15 мая 1958 г., была впервые успешно применена для изучения ионосферы техника исследований, близкая к экспериментальной, использовавшейся ранее для изучения ионизированных газов в лабораторных условиях.

При подготовке к МГГ в Советском Союзе были разработаны новые приборы, основанные на непосредственных измерениях потоков заряженных частиц, которые попадают из окружающей спутник среды в установленное на нем собирающее устройство-ловушку. Следует заметить, что этот метод исследования, впервые примененный на третьем спутнике, впоследствии был применен с некоторыми модификациями в 1960 г. на американском спутнике «Эксплорер VIII», а в 1962 г. — на подготовленном английскими учеными, но запущенном США, англо-американском спутнике UK-I.

При помощи двух двухэлектродных сферических ионных ловушек на третьем спутнике были впервые осуществлены прямые измерения концентрации заряженных частиц в ионосфере на высотах 500—1000 км. Оказалось, что во время этих измерений в мае 1958 г., т. е. во время максимума солнечной активности, на высоте 1000 км днем имелось приблизительно 50 000 ионов в  $1 \text{ см}^3$ .

Впервые поднятый на третьем спутнике ионный масс-спектрометр позволил определить химический состав ионов до высот около 1000 км [9]. В верхней ионосфере доминирующими ионами оказались ионы атомарного кислорода.

По совокупности имевшихся в 1958 г. данных некоторые ученые делали вывод о том, что граница между ионосферой Земли и межпланетным газом проходит где-то на высотах 2—3 тыс. км (напр. [6]). Эта точка зрения высказывалась на V Генеральной Ассамблее СК МГГ в Москве в 1958 г. Однако этому выводу было суждено существовать очень недолго.

В 1959 г. были, как известно, запущены три советские космические ракеты в направлении к Луне. На каждой из них были установлены трехэлектродные ловушки заряженных частиц (являвшиеся дальнейшим развитием конструкции ионных ловушек на третьем спутнике). Эти ловушки позволяли регистрировать токи, создаваемые попадающими в них заряженными частицами из окружающей среды, а также оценивать энергии этих частиц.

Результаты измерений токов, создаваемых заряженными частицами в ловушках, с несомненностью показали, что вплоть до высот около 20 000 км Земля окружена ионизированным газом, состоящим из частиц с тепловыми скоростями [10]. На рис. 2 представлена ориентировочная кривая распределения по высоте заряженных частиц в ионизированной газовой оболочке Земли в период, близкий к максимуму солнечной активности [11]. Эта сводная кривая построена по данным измерений, проведенных в 1958—1959 гг. на геофизических ракетах, третьем спутнике и космических ракетах. Из графика видно, что над главным максимумом ионизации концентрация заряженных частиц падает с высотой существенно медленнее, чем при подъеме в нижней части ионосферы. Этот результат был многократно подтвержден американскими измерениями на ракетах и спутниках в 1959—1960 гг. Подобный высотный ход концентрации на высотах до 1000 км неплохо аппроксимировался сочетанием полупараболы и медленно спадающей экспоненты. На высотах от 1000 до 1500 км в период МГГ отечественных измерений не было (т. е. на космических ракетах измерения начинались примерно с 1,5 тыс. км, а на третьем спутнике кончались на 1000 км). Этот участок показан на графике пунктиром. Американские ученые Бордо, Уиппл и др., проводившие опыты с ловушками на спутнике «Эксплорер VIII» в конце 1960 г., установили, что выше 1000 км начиналась область, где доминировали не ионы атомарного кислорода, а ионы гелия [12]. Отметим, что наличие на этих высотах значительного количества метастабильных атомов гелия было установлено еще раньше советскими геофизиками по наблюдениям эмиссий полярных сияний и сумеречного неба [13].

Существование плазменной оболочки Земли с толщиной порядка 10 тыс. км ранее не предсказывалось и явилось неожиданным открытием. Из рис. 2 видно, что на высотах от  $\sim 1,5$  до 15 тыс. км концентрация частиц оставалась примерно одинаковой, а в интервале 15—20 тыс. км падала. Выше 22 ÷ 24 тыс. км тепловые ионы уже не регистрировались.

Следует иметь в виду, что определение концентраций заряженных частиц на этих участках по измеренным токам не может быть осуществлено с высокой точностью, при этом можно ошибиться в несколько раз, но только в сторону занижения концентрации.

Анализ распределения заряженных частиц показывает, что на высотах, соответствующих измерениям на космических ракетах, преобладают ионы

водорода. Причины сравнительно резкого уменьшения концентрации заряженных частиц на высотах более 15 тыс. км еще не нашли удовлетворительного теоретического объяснения. Нужно подчеркнуть, что высотный ход концентраций заряженных частиц, показанный на рис. 2, характерен только для периода, близкого к максимуму солнечной активности, и существенно меняется при приближении к минимуму солнечной активности. Так,

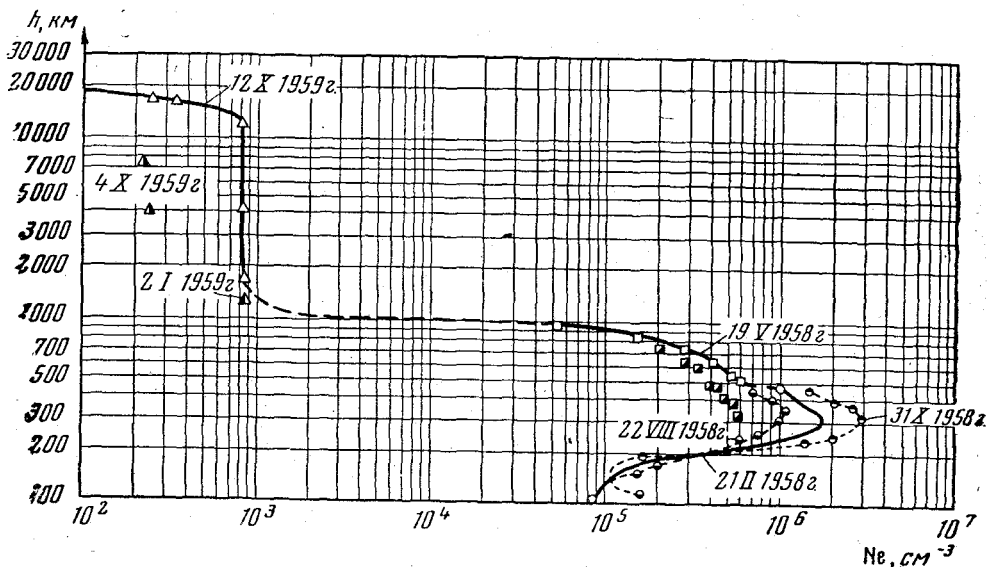


Рис. 2. Кривая распределения по высоте  $h$  заряженных частиц  $Ne$

предварительные данные измерений при помощи ловушек на спутнике «Космос 2», запущенном в апреле 1962 г., показали, что на высотах порядка 550—600 км имело место довольно резкое уменьшение концентрации заряженных частиц, так что закон изменения электронной концентрации в районе главного максимума мог быть аппроксимирован не сочетанием полупараболы с медленно убывающей экспонентой, а скорее симметричной параболой. При этом уже на высотах более 600 км было установлено появление значительных количеств ионов гелия.

Что касается общей протяженности ионизированной газовой оболочки Земли, то последними измерениями на станции «Марс 1» было подтверждено, что она простирается до высот 18—20 тыс. км.

Следует отметить, что, согласно опубликованным данным, американские ученые впервые наблюдали внешнюю часть плазменной оболочки Земли только в 1961 г. на спутнике «Эксплорер X» и лишь до высот порядка 2 радиусов Земли (12 500 км) [14]. Возможно, что расхождения советских и американских данных связаны с различными чувствительностями применявшихся приборов.

Перехожу к вопросу о самом внешнем поясе заряженных частиц, окружающем Землю. Те же ловушки заряженных частиц на лунных советских ракетах, при помощи которых было обнаружено существование плазменной оболочки Земли до высот  $\sim 20$  тыс. км, кроме положительных токов, создаваемых ионами, могли регистрировать и отрицательные токи, создаваемые потоками электронов. При прохождении через область наибольшей интенсивности внешнего радиационного пояса, о котором, в частности, рассказано в предыдущем докладе, в ловушках не наблюдались отрицательные токи. Однако с момента выхода космических ракет за пределы внеш-

него радиационного пояса, когда счетчики космического излучения **начинали** регистрировать нормальный фон космических лучей, на **расстояниях** около 50 тыс. км от Земли в ловушках появились отрицательные токи, **величина** которых возрастала на расстояниях от Земли ~ 65—70 тыс. км. Затем эти токи начинали уменьшаться. На расстояниях, превышавших ~ 80 тыс. км, эти токи уже не наблюдались [10].

Напряжения на электродах ловушек были таковы, что электроны с энергиями менее 200 эв не могли попадать на коллектор и не могли, следовательно, создавать токи в ловушках. Траектории лунных ракет пересекали плоскость геомагнитного экватора примерно в середине участка, на котором регистрировались указанные отрицательные токи.

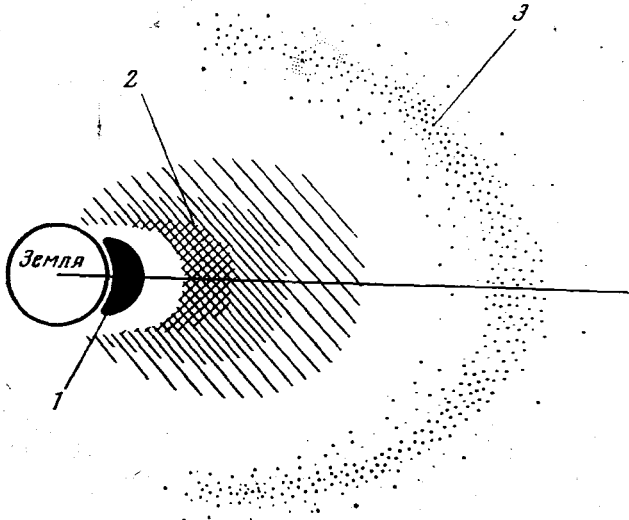


Рис. 3. Радиационные пояса Земли

1 — внутренний; 2 — внешний; 3 — самый внешний пояс заряженных частиц

Анализ полученных результатов привел к следующим выводам:

1. Отрицательные токи создавались потоками электронов с энергиями, большими 200 эв, но меньшими тех минимальных энергий, которыми должны обладать электроны, чтобы быть зарегистрированными счетчиками космических лучей, установленными на тех же ракетах (т. е. энергиями, меньшими 20—30 кэв). Вследствие этого зона существования электронных потоков, обнаруженная вблизи геомагнитного экватора при помощи ловушек, оставалась как бы не видимой для счетчиков космических лучей.

2. Потоки электронов во внешнем радиационном поясе меньше, чем потоки, которые могут создавать минимальный ток, регистрируемый в ловушках. Поэтому внешний радиационный пояс остается как бы не видимым для ловушек. Потоки электронов, соответствующие зарегистрированным отрицательным токам в ловушках, могли быть оценены как лежащие в пределах от  $1,5 \cdot 10^8$  до  $4 \cdot 10^8$  частиц  $\text{см}^2/\text{сек}$ .

Было предположено, что внутренняя граница зоны существования открытых электронных потоков определяется силовыми линиями геомагнитного поля и проходит вдоль внешней границы второго радиационного пояса Земли. Схема взаимного расположения вновь открытого самого внешнего пояса заряженных частиц и радиационных поясов Земли была опубликована в начале 1960 г. в виде, показанном на рис. 3 [15].

Предварительные данные измерений, проведенных через три года после полетов первых лунных ракет при помощи ловушек заряженных частиц на станции «Марс 1», свидетельствуют в пользу того, что границы самого внешнего пояса действительно связаны с силовыми линиями геомагнитного поля, а сам этот пояс является устойчивым образованием, хотя границы его могут несколько перемещаться. При помощи станции «Марс 1» впервые удалось отчетливо зарегистрировать область пересечения ионизированной газовой оболочки Земли самым внешним поясом заряженных частиц. Интересно отметить, что эта область примерно совпадает с областью, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния. Наблюдение области, в которой самый внешний пояс заряженных частиц проникает в плазменную оболочку Земли, оказалось возможным вследствие того, что траектория станции «Марс 1» прошла в более высоких геомагнитных широтах, чем траектории предыдущих советских космических ракет. Так как потоки электронов в самом внешнем поясе значительно больше, чем в радиационных поясах, а энергии и, следовательно, скорости частиц значительно меньше, то ясно, что концентрация электронов в самом внешнем поясе больше, чем в радиационных поясах. Учитывая, что эта зона является внешней по отношению к поясам радиации и имеет сечение в плоскости геомагнитного экватора с линейными размерами порядка десятков тысяч километров, можно утверждать, что общее количество заряженных частиц в этой зоне существенно превышает количество частиц, захваченных геомагнитным полем в радиационных поясах. Одной из важнейших задач будущих исследований околоземного пространства является определение энергетического спектра содержащихся в самом внешнем поясе электронов.

Международный геофизический год особенно ярко продемонстрировал, что развитие науки является результатом коллективных усилий ученых многих стран. Приятно отметить, что в разделе науки, которому посвящен этот доклад, вклад советских ученых весьма значителен.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ракетные исследования верхней атмосферы. Под ред. Р. Л. Бойда и М. Дж. Ситона. М., 1957, стр. 295.
2. Э. Бургесс. К границам пространства. М., 1957, стр. 136.
3. J. V. Evans, J. Atm. Terr. Phys. 11, 1957, 249.
4. Правда, 27 марта 1958.
5. К. И. Грингауз. Докл. АН СССР, 1958, 120, № 6, 1234.
6. Я. Л. Альперт, Э. Ф. Чудесенко, Б. С. Шапиро. В сб. «Предварительные итоги научных исследований с помощью первых советских искусственных спутников Земли и ракет». М., 1958, стр. 40.
7. А. Н. Казанцев, Т. С. Романова, А. Я. Клементенко. Радиотехника и Электроника, 1958, 3, 1107.
8. W. W. Berging. Proceeding of the I. R. E., 1959, 47, N 2, 280.
9. В. Г. Истомин. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 2. Изд-во АН СССР, 1959, стр. 32.
10. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров и Р. Е. Рыбчинский. Докл. АН СССР, 1960, 131, № 6.
11. К. И. Грингауз. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 11. Изд-во АН СССР, 1962.
12. R. E. Bourdeau, J. L. Donley, E. C. Whipple Jr., S. J. Bauer. J. Geophys. Res., 1962, 67, N 2, 467.
13. Н. Н. Шефов. Ann. geophys., 1961, 17, 395.
14. H. S. Bridge, C. Dilworth, A. J. Lazarus, E. F. Lyon, B. Rossi, F. Scherb. Space Research — III, North-Holland Amsterdam, 1962.
15. К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский. Докл. АН СССР, 1960, 132, № 5, 1062.