

Д О К Л А Д Ы  
АКАДЕМИИ НАУК СССР

---

1958

Том 120, № 6

К. Н. ГРИНГАУЗ

**РАКЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ  
В ИОНОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАКОРОТКОВОЛНОВОГО  
ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

*(Представлено академиком А. Н. Щукиным 22 IV 1958)*

Основным источником современных сведений об ионосфере являются исследования с помощью радиоволн. Методы таких исследований можно разделить на три группы: 1) исследования с помощью отраженных от ионосферы радиоволн, излучаемых наземными передатчиками; 2) изучение радиоизлучения, проходящего через ионосферу (от внеземных источников — Солнца, радиозвезд, при радиолокации Луны); 3) исследование излучения источников, движущихся в самой ионосфере (ракет, искусственных спутников Земли).

Имевшиеся до недавнего времени данные об ионосфере были получены в основном методами первой группы, особенно методом импульсного радиозондирования ионосферы. Однако изучение сигналов, отраженных от ионосферы, принципиально не может решить задачу об определении распределения электронной концентрации по всему вертикальному разрезу атмосферы, так как этим методом нельзя полностью исследовать обширные области ионосферы, в которых плотность ионизации убывает с высотой или не превышает плотности ионизации в нижележащих областях. В самом деле, если анализ группового запаздывания импульсов радиоволн различных частот, отраженных от слоя  $F$ , позволяет делать некоторые выводы об электронной концентрации в области, лежащей над максимумом ионизации так называемого слоя  $E$ , то область, находящаяся над максимумом верхнего из наблюдаемых с помощью отраженных радиоволн слоев, вообще не может изучаться этим методом.

При изучении ионосферы посредством наблюдения радиоизлучения внеземных источников, прошедшего через всю толщу земной атмосферы, можно определить интегральную концентрацию электронов во всем вертикальном столбе воздуха. Сопоставляя эти данные с наблюдениями ионосферных станций, можно сделать некоторые заключения об электронной концентрации областей ионосферы, лежащих выше максимумов ионосферных слоев, однако этот метод не позволяет получить данные об истинном распределении электронной концентрации по высоте во всех его деталях.

Таким образом, данные о распределении электронной концентрации по всему вертикальному разрезу атмосферы не могут быть получены при помощи методов первой и второй групп. Эту задачу можно решить с помощью радиометодов только при условии, если источники излучения радиоволн с частотами, превышающими критические частоты ионосферных слоев, перемещаются по высоте в самой ионосфере, причем важно, чтобы вертикальные перемещения источников излучения существенно превышали их горизонтальные перемещения. Последнее условие хорошо выполняется при вертикальных пусках высотных ракет.

В последние годы опубликован ряд материалов по измерениям электронной концентрации в ионосфере, проведенным в США с помощью ракет (1-6).

Большинство этих измерений относится к областям до 200 км (<sup>1-4</sup>) и лишь одно из них (<sup>6</sup>) проведено до высоты 380 км. Цель настоящей заметки — сообщить о некоторых результатах измерений распределения по высоте электронной концентрации в ионосфере, проведенных во время пусков высотных геофизических ракет Академии наук СССР в 1954—1958 гг., в том числе во время пуска 21 II 1958 г. геофизической ракеты, достигшей высоты 473 км. В основу определения электронной концентрации были положены измерения дисперсии излучаемых с ракеты радиоволн, проводимые методом дисперсионного интерферометра, предложенным Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси (<sup>7</sup>).

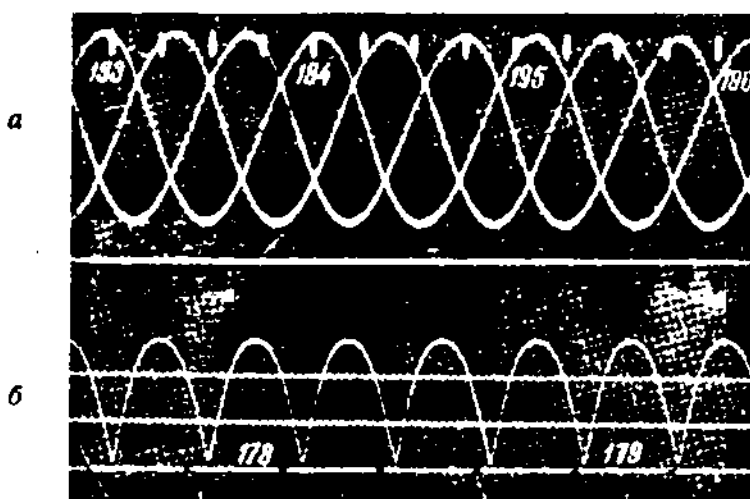


Рис. 1. а — образец записи перемещений характерных точек кривых Лиссажу; б — образец записи интерференционной частоты шлейфовым осциллографом

Опыты были поставлены следующим образом: на ракете, запускаемой под малым углом к вертикали, устанавливались радиопередатчики, излучавшие когерентные радиоволны ультракоротковолнового диапазона с частотами  $f_1$  и  $f_2 = \rho f_1$ . Во время полета на Земле в двух пунктах принимались радиоволны, излучаемые с ракеты, и непрерывно регистрировались разности фаз и уровни принимаемых колебаний. Одновременно производились измерения координат ракеты оптическими и радиотехническими методами, а также радиозондирование ионосферы с помощью панорамной ионосферной станции, расположенной вблизи места старта ракеты. Для увеличения фазовой чувствительности приемно-фазометрических устройств в них применялись последовательные умножения частот и гетеродирование принятых сигналов. Регистрация разности фаз осуществлялась двумя методами: непрерывным фотографированием характерных точек фигуры Лиссажу с трубки катодного осциллографа (<sup>8</sup>) и записью на шлейфовом осциллографе колебаний интерференционной частоты, образующихся после детектирования суммы обоих принятых сигналов (в последнем случае сигнал с частотой  $f_1$  предварительно умножался по частоте в  $\rho$  раз больше, чем сигнал с частотой  $f_2$ ). Образцы двух видов записи разности фаз приведены на рис. 1.

Приводимые ниже результаты измерений относятся к опытам, во время которых  $f_1 = 48 \cdot 10^6$  гц,  $f_2 = 144 \cdot 10^6$  гц ( $\rho = 3$ ). Для радиоволн с такими частотами коэффициент преломления в ионосфере  $n'$  принимался не зависящим от частоты соударений электронов и от магнитного поля Земли и мало отличающимся от единицы, т. е. считалось, что

$$n_f \approx 1 - \frac{Ne^2}{2\pi m f^2}, \quad (1)$$

где  $N$  — эффективная концентрация электронов (в  $\text{см}^{-3}$ );  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона;  $f$  — частота (в герцах).

В месте приема разность фаз двух принимаемых радиоволн за счет их дисперсии (отнесенная к более высокой частоте) равна

$$\Phi = \frac{2\pi p f_1}{c} \int_0^L (n_{pf_1} - n_{f_1}) dl; \quad (2)$$

интегрирование ведется на пути от передающей до приемной антенн,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/сек.

Изменение  $\Phi$  при изменении  $L$  от  $L$  до  $L + \Delta L$  (с учетом (1))

$$\Delta\Phi = \frac{e^2}{m c f_1} \left( \frac{p^2 - 1}{p} \right) \int_L^{L+\Delta L} N dl, \quad (3)$$

а среднее значение  $N$  на пути  $\Delta L$

$$N_{\text{ср}} = \frac{1}{\Delta L} \int_L^{L+\Delta L} N dl = \frac{c m f_1}{e^2} \frac{p}{p^2 - 1} \frac{\Delta\Phi}{\Delta L}. \quad (4)$$

При этом предполагалось, что за время изменения  $L$  на величину  $\Delta L$  величина  $\int_0^L N dl$  не меняется. Отличия  $\Delta L$  от  $\Delta H$  — приращения высоты над Землей — учитывались при обработке результатов измерений.

Все пуски ракет, упомянутые далее, проведены в средних широтах европейской части СССР, время везде указано местное. При построении графиков (рис. 2, 3 и 4) использованы данные, полученные только на восходящих участках траектории ракет (т. е. при подъеме).

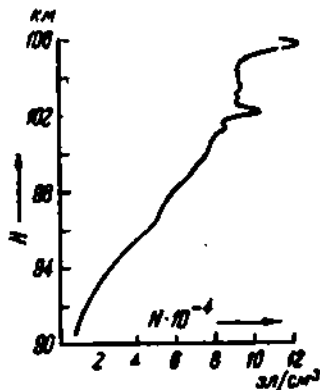


Рис. 2. Распределение эффективной электронной концентрации по высоте  $N = f(H)$ , полученное при пуске ракеты АН СССР 26 VI 1954 г. в 17 час. 24 мин.

График на рис. 4 построен по данным предварительной обработки результатов измерений, усредненным по большим интервалам высоты. Во время опыта 21 II 1958 г. проводилась дополнительная регистрация разности фаз принимавшихся радиоволн с частотой  $144 \cdot 10^6$  гц и когерентных радиоволн с частотой  $24 \cdot 10^6$  гц (также излучавшихся с ракеты). Зарегистрировано вращение плоскости поляризации у всех принимавшихся радиоволн, вызванное магнитонным расщеплением их в ионосфере. Детальное распределение  $N = f(H)$  до высоты 470 км и другие данные этого опыта будут опубликованы после обработки результатов.

Приведенные на рис. 3 и 4 результаты измерений, относящихся к области, лежащей ниже максимума ионизации слоя  $F$ , так же как и измерения Сэддона, Джексона и Пикара<sup>(3,4)</sup>, позволяют заключить, что резко выраженного слоя  $E$  ионосферы не существует. Результаты измерений, проведенных 21 II 1958 г. над максимумом ионизации слоя  $F$ , значительно расходятся с данными Бернинга<sup>(5)</sup>, согласно которым величина  $N$  над максимумом слоя  $F$  быстро падает и уже на высоте 378 км очень мала. Следует отметить, что с точки зрения фазы цикла солнечной деятельности,

времени года и времени суток наши измерения 21 II 1958 г. и измерения, описанные в (9), вполне сопоставимы.

Результаты, приведенные на рис. 3 и 4, были сопоставлены с одновременными измерениями ионосферной станции. При этом оказалось, что в действительности высоты, на которых отражаются радиоволны ионосфер-

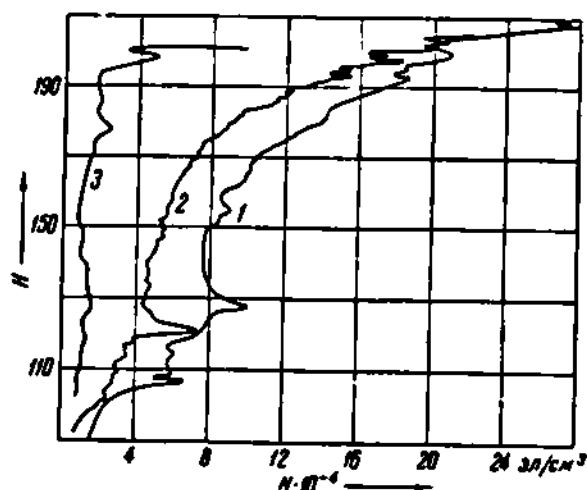


Рис. 3. Графики  $N = f(H)$ , полученные при пусках ракет АН СССР в 1957 г. 1 — 16 V в 6 час. 18 мин., 2 — 25 VIII в 6 час. 27 мин. и 9 IX в 19 час. 54 мин.

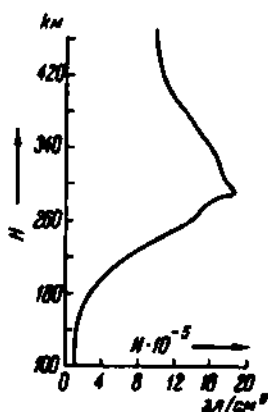


Рис. 4. График  $N = f(H)$ , полученный при пуске ракеты АН СССР 21 II 1958 г. в 11 час. 40 мин.

ной станции в области слоя  $F$ , лежат, в зависимости от состояния ионосферы, на 50—150 км ниже, чем действующие высоты, регистрируемые ионосферной станцией.

Накопление результатов ракетных ионосферных измерений и одновременных измерений методом отраженных радиоволн позволит интерпретировать результаты наблюдений ионосферных станций существенно более правильно, чем это делается в настоящее время. Дальнейшее увеличение высоты прямых измерений, проводимых в ионосфере, даст возможность решить неясный в настоящее время вопрос о высоте верхней границы ионосферы, на которой величина  $N$  соответствует концентрации электронов в межпланетном пространстве.

Поступило  
11 IV 1958

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. C. Seddon<sup>2</sup> J. Geophys. Res., 58, № 3, 323 (1953). <sup>2</sup> J. E. Jackson J. Geophys. Res., 59 № 3, 377 (1954). <sup>3</sup> J. C. Seddon, J. Geophys., 59, № 4, 463 (1954). <sup>4</sup> J. C. Seddon, A. D. Pickar, J. E. Jackson, J. Geophys. Res., 59, № 4, 513 (1954). <sup>5</sup> J. R. Lien, R. J. Marcou et al., Rocket Exploration of the Upper Atmosphere, London, 1954. <sup>6</sup> W. W. Berning, J. Meteorol., 8, № 3, 175 (1951). <sup>7</sup> Сборн. Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности, под ред. Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекся, 1945. <sup>8</sup> Е. Я. Щеголев, К. Э. Виллер, И. М. Борушко, там же, стр. 45.