



**Ракетное
зондирование
верхней
атмосферы
и ионосферы**

СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ



*Ракетное
зондирование
верхней атмосферы
и ионосферы
до высоты 1500 км*

*Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
К. И. Грингауз*

Ростов-на-Дону

Издательство Ростовского университета
1989

P19
УДК 551.510:550.380.8;629.79

*Печатается по решению отделения физики
и атомной энергетики Северо-Кавказского научного центра
высшей школы*

Рецензенты

доктор физико-математических наук М. Н. Изаков,
доктор физико-математических наук Е. Г. Фесенко,
кандидат физико-математических наук Н. В. Кривошеев

Редакционная коллегия:
К. И. Грингауз (отв. редактор),
П. Ф. Денисенко, В. Г. Истомин,
Н. Е. Шейдаков, Н. М. Шютте

Редактор *В. И. Литвиненко*

P $\frac{1704060000-060}{M175(03)-89}$ 24-89

ISBN 5-7507-0208-1

the Geophysical rockets of type «Vertical» in period of Increasing Solar Activity. Paper presented to the COSPAR Meeting. Budapest, 1980.

5. Rush D. W., Sharp W. E., Hays P. B. // J. Geophys. Res. 1975. 80.1832.

6. Mantas G. P. // Aeronomy Rep. 1975. 54. 26.

7. Serafimov K., Gogoshev M., Kutiev I. // Comt. Rendus Acta Bul. Sci. 1975. 32. 35.

УДК 551.590.21.523.74.510

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДО ВЫСОТ 450—1500 КМ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ—СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЬЮ IRI, ЗНАЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

К. И. Грингауз, Н. Е. Шейдаков (СССР)

Начиная с 1958 по 1981 г. в средних широтах европейской части СССР Радиотехническим институтом АН СССР, затем Институтом космических исследований АН СССР и Ростовским госуниверситетом (с 1975 г.) при использовании геофизических ракет были проведены эксперименты по измерению электронной концентрации методом дисперсионного радиоинтерферометра.

В результате многолетних, регулярных измерений получены данные о поведении электронной концентрации в ионосфере при различных уровнях солнечной активности на протяжении более двух полных циклов солнечной активности. Больше половины экспериментов были проведены в осеннее время, главным образом утром при зенитных углах Солнца $\chi \geq 65^\circ$. Остальные — летом и весной.

Полученные профили электронной концентрации $n_e(h)$ [1—3] представлены на рис. 1, 2 в хронологическом порядке (сплошные кривые). Хотя запуски ракет проводились редко (в среднем 1 раз в год, см. таблицу), однако систематичность идентичных измерений на протяжении длительного периода позволяет сделать определенные выводы о временной динамике ионосферной плазмы.

Нетрудно заметить влияние солнечной активности на вариации ионосферной плазмы, а именно: на концентрацию плазмы в максимуме слоя $n_{e\max}F$, высоту максимума слоя $h_{\max}F$, характер высотной зависимости $n_e(h)$. С уменьшением активности концентрации в максимуме и высота максимума слоя падает, а высотные изменения $n_e(h)$ становятся более «симметричными» относительно максимума. Для наглядности на рис. 3 (осеннее время) и рис. 4 (весна—лето) приведены значения $n_{e\max}F$ и $h_{\max}F$ совместно с данными о потоке радиоизлучения $F_{10.7}$ и K_p -индексами, а n_{em} — с интенсивностью потока $F_{10.7}$.

Для проверки достоверности современных эмпирических моделей

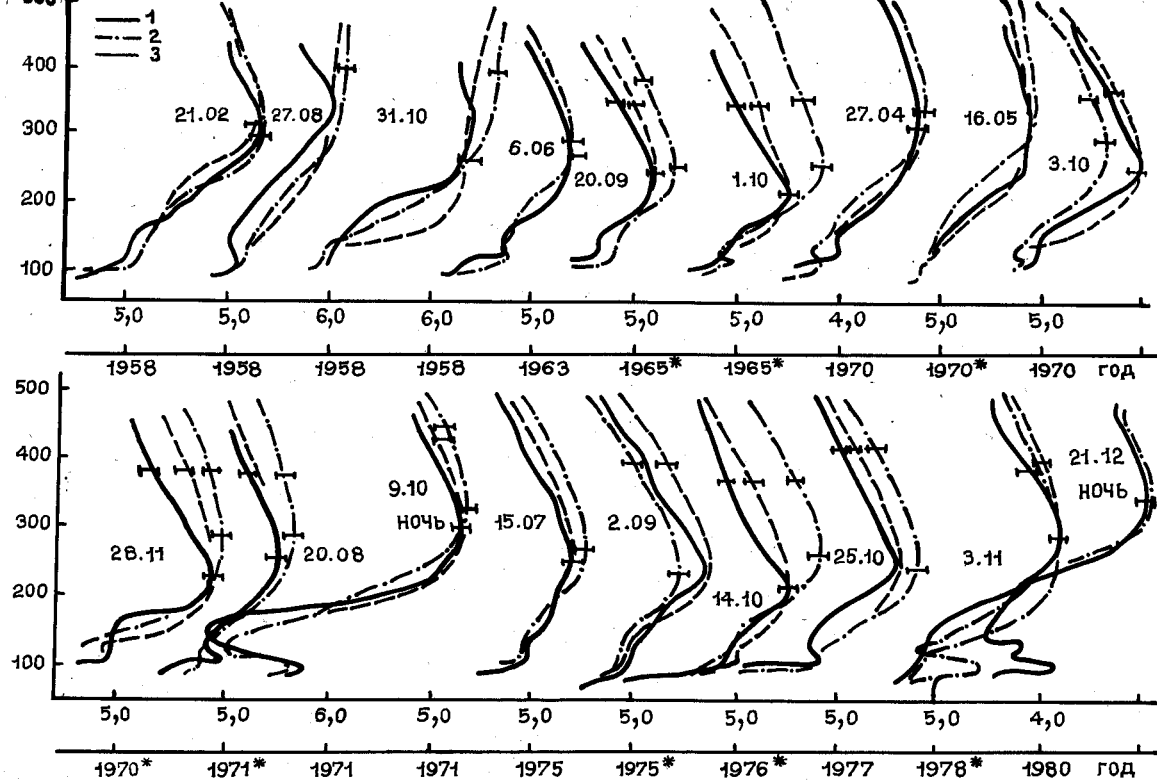


Рис. 1. Сравнение ракетных профилей электронной концентрации с эмпирической моделью IRI-79 в цикле солнечной активности: 1—ракетный; 2—модель с коррекцией; 3—модель без коррекции

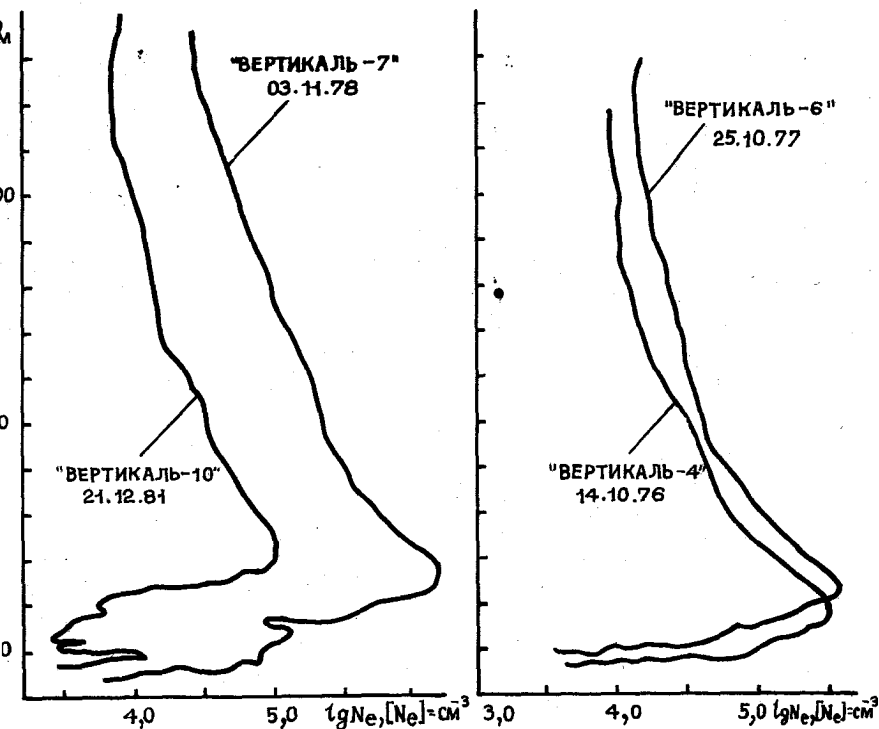
**Ракетные эксперименты по измерению электронной концентрации
в средних широтах европейской части СССР**

№ эксперимента	Дата	Время LT, ч, мин	Зенитный угол Солнца, град	Солнечный поток, Вт·м ⁻² Гц (F _{10.7})	K _p	Число солнечных пятен	Нестационарность, м ⁻² ·с ⁻¹
1	21.02.58	11 42	60	175	4 ₋	144	5·10 ¹³
2	27.08.58	8 05	65	220	6 ₀	288	5·10 ¹³
3	31.10.58	15 45	76	222	2 ⁺	311	—
4	06.06.63	5 36	77	75	0 ⁺	11	—
5	20.09.65	7 27	75	80	1 ₀	0	—
6	01.10.65	7 57	74	80	0 ₀	73	1,8·10 ¹³
7	27.04.70	5 15	87	144	4 ⁺	122	1,5·10 ¹³
8	16.05.70	5 29	80	192	1 ₀	196	6·10 ¹³
9	03.10.70	7 28	78	126	3 ₀	57	4·10 ¹³
10	28.11.70	8 30	82	148	2 ⁻	137	3·10 ¹³
11	20.08.71	6 20	77	141	0 ⁺	127	2·10 ¹³
12	09.10.71	21 2	123	98	4 ⁺	59	5·10 ¹¹
13	15.07.75	6 40	67	86	2 ₀	50	1·10 ¹³
14	02.09.75	7 40	68	86	3 ₀	15	4·10 ¹³
15	14.10.76	13 50	62	84	1 ₀	34	1,5·10 ¹³
16	25.10.77	15 15	74	88	0 ₀	38	0,8·10 ¹³
17	03.11.78	15 05	76	162	2 ⁺	120	2,1·10 ¹³
18	21.12.81	21 35	142	143	2 ₋	59	0,3·10 ¹³

ионосферы экспериментальные профили $n_e(h)$ сравнивались с эмпирической Международной моделью ионосферы IRI-79. Эта модель позволяет получать профили электронной концентрации для конкретно заданных условий.

При определении расчетных профилей $n_e(h)$ были рассмотрены два случая. В первом значении $p_{em}F$ и h_mF соответствовали IRI-79 с учетом геомагнитной широты, сезона, зенитного угла Солнца, уровня геомагнитной активности. Во втором указанные профили были скорректированы по данным радиозондирования, поскольку, как показано было ранее [4], ракетные значения p_{em} и полученные с помощью ионозонда практически совпадали.

Для сравнения с экспериментом модельные профили $n_e(h)$ представлены также на рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей свидетельствует о том, что в большинстве случаев нами наблюдается довольно значительное различие, наиболее резко проявляющееся выше максимума слоя. Наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными зависимостями $n_e(h)$ соответствует спокойным гелиогеофизическим условиям в период минимума солнечной активности (06.06.63, 15.07.75), но не во всех случаях (20.09.65, 14.10.76, 25.10.77). Это означает, что модельные представления поведения ионосферной плазмы можно использовать в весьма ограниченных пределах, и можно, по-види-



с. 2. Высотные ракетные профили электронной концентрации

ому, считать, что для условий высокой и возрастающей солнечной активности модель IRI-79 неприменима.

Таким образом, с одной стороны, поведение среднеширотной ионосферной плазмы на высотах области F довольно четко контролируется гелиогеофизическими параметрами $F_{10,7}$ и K_p (см. рис. 3 4), а с другой — реальные профили $n_e(h)$ согласуются с моделью I-79 лишь в отдельных случаях, в основном при спокойной и стационарной геомагнитной обстановке.

Для ряда ракетных пусков регистрация n_e сочеталась с одновременными прямыми измерениями потоков ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца (пеоктическим методом) и его поглощения в земной атмосфере [5, 6], даты этих измерений отмечены звездочкой на рис. 1. Данные о поглощении солнечного излучения пользовались для определения концентрации и состава нейтральных частиц [5, 6].

Анализ одновременных измерений нейтрального состава и

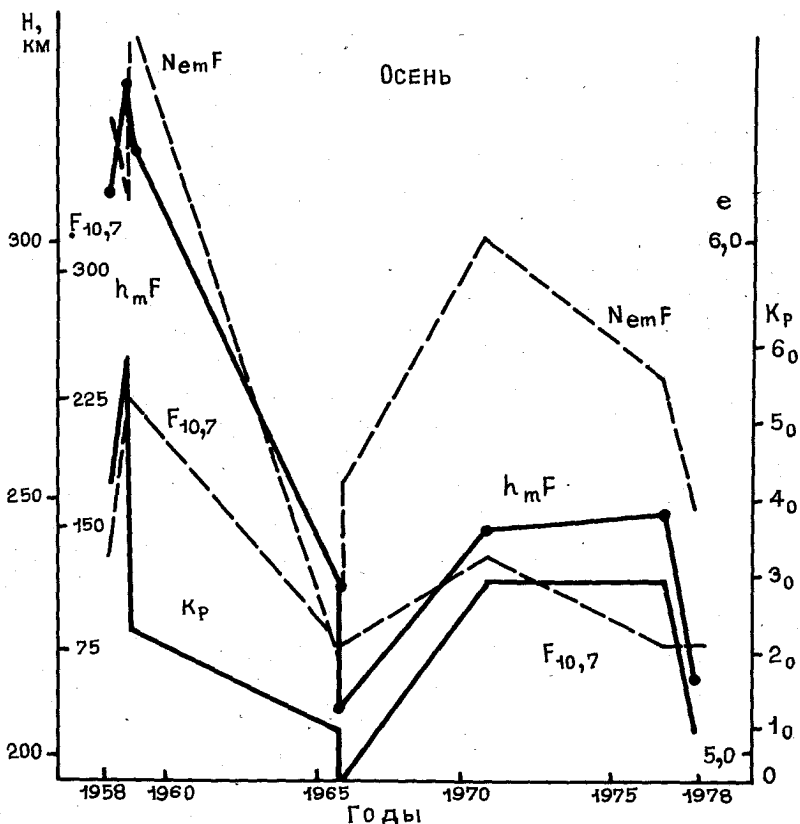


Рис. 3. Временной ход параметров $N_{em}F$ и $h_m F$ и гелиогеофизических параметров

электронной концентрации с учетом ионизации под действием нейтральных ветров [6] показал, что распределения $n_e(h)$ выше $h_m F$ существенным образом зависят как от состава нейтральной атмосферы, так и от дрейфа ионизации [7]. Так, например, 03.10.70 и 28.11.70 экспериментальные значения $h_m F$ оказались меньше модельных. В работе [6] было отмечено, что высотные изменения $n_e(h)$ выше $h_m F$ и уменьшение высоты $h_m F$ связано с направленным вниз дрейфом ионизации, скорость которого превышала 10 м/с. В случае же, когда скорость дрейфа не превышала 10 м/с (20.08.71), различие между экспериментальным и модельным значениями $h_m F$ оказалось незначительным.

Данные рис. 1 позволяют сказать, что наибольшее различие между экспериментальными и модельными профилями $n_e(h)$ имело место для осенних экспериментов (сентябрь—ноябрь), в том числе

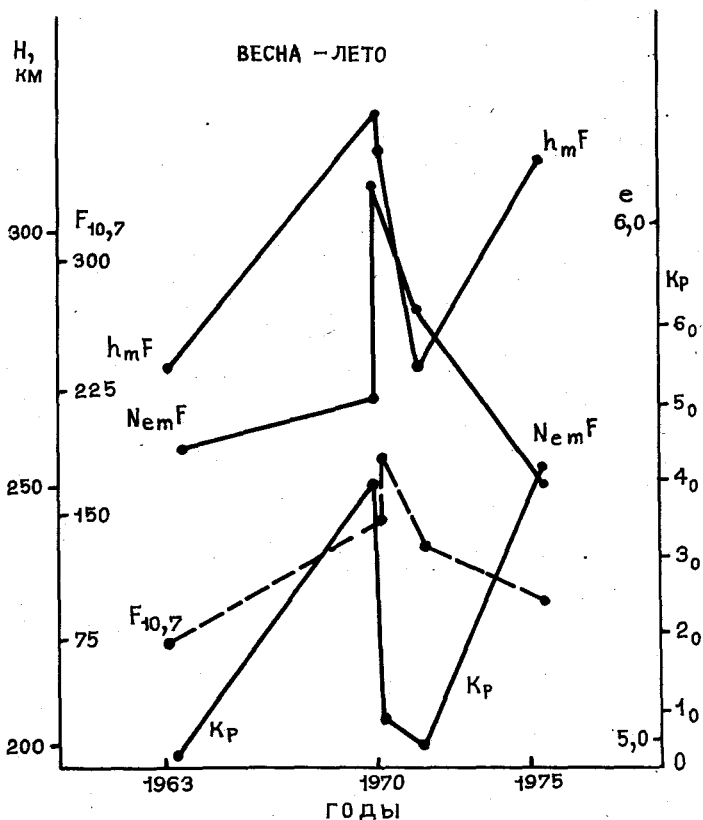


Рис. 4. Временной ход $N_{em}F$ и h_mF и гелиогеофизических параметров

и при низкой солнечной активности. В работах [8, 9] отмечено, что во время низкой и средней солнечной активности наблюдавшиеся изменения нейтрального состава хорошо согласуются с сезонными вариациями плотности и состава нейтрального газа. Не исключено, что именно изменения в составе нейтральной атмосферы приводят к искажениям высотных зависимостей $n_e(h)$, особенно выше h_mF .

В области F земной ионосферы поведение $n_e(h)$ в основном определяется фотохимическими процессами [10].

Характерно, что наибольшие значения n_e в максимуме слоя F2 наблюдались в годы максимума солнечной активности ($n_{e,max} \approx (1-2) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$) — 1958, 1978, 1981 гг. Проведение в 1978 г. измерения параметров нейтральной атмосферы свидетельствовало о довольно значительных изменениях N_e , а именно: при возросшей общей плотности нейтральных частиц относительное содержание моле-

**Ракетные эксперименты по измерению электронной концентрации
в средних широтах европейской части СССР**

№ эксперимента	Дата	Время ЛТ, ч, мин	Зенитный угол Солнца, град	Солнечный поток, Вт·м ⁻² Гц (F _{10.7})	K _p	Число солнеч- ных пятен	Неста- ционар- ность, м ⁻² ·с ⁻¹
1	21.02.58	11 42	60	175	4 ₋	144	5·10 ¹³
2	27.08.58	8 05	65	220	6 ₀	288	5·10 ¹³
3	31.10.58	15 45	76	222	2 ⁺	311	—
4	06.06.63	5 36	77	75	0 ⁺	11	—
5	20.09.65	7 27	75	80	1 ₀	0	—
6	01.10.65	7 57	74	80	0 ₀	73	1,8·10 ¹³
7	27.04.70	5 15	87	144	4 ⁺	122	1,5·10 ¹³
8	16.05.70	5 29	80	192	1 ₀	196	6·10 ¹³
9	03.10.70	7 28	78	126	3 ₀	57	4·10 ¹³
10	28.11.70	8 30	82	148	2 ⁻	137	3·10 ¹³
11	20.08.71	6 20	77	141	0 ⁺	127	2·10 ¹³
12	09.10.71	21 2	123	98	4 ⁺	59	5·10 ¹¹
13	15.07.75	6 40	67	86	2 ₀	50	1·10 ¹³
14	02.09.75	7 40	68	86	3 ₀	15	4·10 ¹³
15	14.10.76	13 50	62	84	1 ₀	34	1,5·10 ¹³
16	25.10.77	15 15	74	88	0 ₀	38	0,8·10 ¹³
17	03.11.78	15 05	76	162	2 ⁺	120	2,1·10 ¹³
18	21.12.81	21 35	142	143	2 ₋	59	0,3·10 ¹³

ионосферы экспериментальные профили $n_e(h)$ сравнивались с эмпирической Международной моделью ионосферы IRI-79. Эта модель позволяет получать профили электронной концентрации для конкретно заданных условий.

При определении расчетных профилей $n_e(h)$ были рассмотрены два случая. В первом значении $p_{em}F$ и h_mF соответствовали IRI-79 с учетом геомагнитной широты, сезона, зенитного угла Солнца, уровня геомагнитной активности. Во втором указанные профили были скорректированы по данным радиозондирования, поскольку, как показано было ранее [4], ракетные значения p_{em} и полученные с помощью ионозонда практически совпадали.

Для сравнения с экспериментом модельные профили $n_e(h)$ представлены также на рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей свидетельствует о том, что в большинстве случаев нами наблюдается довольно значительное различие, наиболее резко проявляющееся выше максимума слоя. Наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными зависимостями $n_e(h)$ соответствует спокойным гелиогеофизическим условиям в период минимума солнечной активности (06.06.63, 15.07.75), но не во всех случаях (20.09.65, 14.10.76, 25.10.77). Это означает, что модельные представления поведения ионосферной плазмы можно использовать в весьма ограниченных пределах, и можно, по-види-

кулярной компоненты оказалось значительно уменьшенным, а концентрация атомарного кислорода намного превышала наблюдающуюся в годы низкой солнечной активности [8]. Это означает, что при возрастании солнечной активности относительные изменения состава нейтрального газа могут быть очень велики, что приводит к качественным изменениям динамических характеристик аэрономических процессов в верхней атмосфере, усилению дрейфовых движений и неустойчивостей, а в конечном итоге — к изменениям параметров ионосферной плазмы.

Таким образом, проведенный анализ результатов однотипных длительных измерений высотных распределений электронной концентрации $n_e(h)$ в средних широтах свидетельствует о том, что поведение ионосферной плазмы зависит от большого числа различных факторов, имеющих довольно сложные причинно-следственные связи. Модельное представление $n_e(h)$ можно, по-видимому, использовать для описания усредненных, феноменологических характеристик плазмы. Реально наблюдаемые профили, зависящие от реальных распределений нейтральных частиц, потоков, ионизирующего солнечного излучения, дрейфа ионизации и пр., во многих случаях не имеют хорошего согласия с модельными. Действительно, модели могут не отражать, например, возможного изменения распределения спектральной интенсивности ультрафиолетового солнечного излучения [8], теплового баланса и локальных вариаций состава нейтральной атмосферы, непосредственно влияющих на распределение $n_e(h)$.

Известно [11], что эмпирические модели достаточно хорошо описывают глобальное распределение основных параметров ионосферы (критических частот и приведенной высоты максимума слоя F2). При описании вертикального распределения электронной концентрации они не позволяют представить широкий набор гелиогеофизических условий и не могут отразить вариации высотного профиля концентрации. Использование детерминированных моделей, во-первых, оказывается довольно сложным, поскольку они определяются системами большого числа нелинейных уравнений, а во-вторых, они неточны вследствие неопределенности задания конкретных значений параметров уравнений и невозможности учета всех имеющих место физических процессов. В частности, в любом конкретном случае недостаточно известны такие важные параметры как интенсивность и спектральное распределение излучения Солнца, его вариации с солнечной активностью. Кроме того, имеют место трудности с заданием граничных условий [11], определяемых, в частности, обменом плазмы между ионосферой и плазмосферой. Поэтому строго детерминированные модели практически не используются. Чтобы расширить возможности их применения тем или иным способом, вводят эмпирические данные (модель нейтральной

атмосферы, высота максимума слоя, граничные условия и пр.). Другими словами, формируются так называемые полуэмпирические модели [11]. Однако даже самые совершенные полуэмпирические модели, хорошо отражающие глобальные характеристики и вариации ионосферы, по-видимому, не могут дать достоверное представление о конкретном $n_e(h)$ -профиле применительно к какому-либо конкретному пункту и дате.

Во всяком случае, набор реальных профилей $n_e(h)$ и соответствующих временных распределений других параметров верхней атмосферы, полученных в определенном геофизическом пункте при различных гелиогеофизических условиях, является весьма нужным средством проверки эффективности существующих и создаваемых вновь ионосферных моделей.

Литература

1. Грингауз К. И., Рудаков В. А., Капорский А. В. // Искусственные спутники Земли. М., 1961. Вып. 6. С. 33.
2. Грингауз К. И., Рудаков В. А. // Там же С. 48.
3. Данилкин Н. П., Иванов-Холодный Г. С. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. 25. 759.
4. Бирюков А. В. и др. // Космические исследования. 1978. 16. 715.
5. Грингауз К. И., Гдалевич Г. Л., Рудаков В. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. 8. 224.
6. Шютте Н. М. // Ионосферные исследования. 1972. 20. 36.
7. Gringaus K. I., Shutte N. M. // J. Atmos. Terr. Phys. 1974. 36. 2013.
8. Шютте Н. М. // См. настоящий сб. С. 14—42.
9. Shutte N. M. // Space Res. 1976. 16. 361.
10. Бирюков А. В., Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф. и др. // Космические исследования. 1980. 18. 748—753.
11. Поляков В. М. и др. // Материалы Мирового центра данных. Б. МКК. М., 1986.

УДК 551.510; 550.380.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ РАКЕТЫ «ВЕРТИКАЛЬ-10»

**А. В. Бирюков, И. А. Кнорин, В. А. Рудаков, Л. А. Шнырева,
Г. М. Кучеренко, Н. Е. Шейдаков, Ю. К. Часовитин (СССР)**

21 декабря 1981 г. ($F_{10.7} = 10^{-22}$ Вт·м⁻²·Гц⁻¹, $K_p = 2_-$) в средних широтах европейской части СССР во время полета геофизической ракеты «Вертикаль-10» в числе других экспериментов были проведены измерения концентрации электронов n_e в ионосфере методом ракетного дисперсионного УКВ-радиоинтерферометра.

В отличие от предыдущих экспериментов, проводимых на геофи-