

УДК 621.371.25

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХДЛИННЫХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.**II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИСЗ «КОСМОС-142» И «КОСМОС-259»***В. И. Аксенов*

Приведены результаты выполненных на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» экспериментальных исследований распространения в ионосфере радиоволн частот 16,1, 31,85 и 42,85 *кГц*. Экспериментально подтверждены основные теоретические выводы: явление широтной «отсечки» вблизи геомагнитного экватора, существенные различия частотной зависимости коэффициента прохождения и интерференционной структуры поля в ионосфере в дневное и ночное время и т. д. Обнаружена зависимость величины напряженности поля СДВ в ионосфере от зенитного угла Солнца, анализ которой показал, что на средних широтах электронная концентрация на высотах до 100—120 *км* в ионосфере увеличивается в 6—8 раз при изменении зенитного угла Солнца от 60—70° до 30°. В результате исследования характеристик СДВ сигналов (амплитуды, времени группового запаздывания и др.), принятых в магнитосопреженной области, установлено, что распространение СДВ в магнитосфере происходило вдоль уплотнений ионизации, ориентированных геомагнитным полем.

В ч. I статьи [1] были изложены результаты теоретических исследований распространения сверхдлинных радиоволн (СДВ) в ионосфере Земли. Данная статья посвящена анализу экспериментальных данных, полученных на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» и их сравнению с результатами теоретических расчетов.

1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Эксперименты по исследованию влияния ионосферы на распространение СДВ были осуществлены на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» в 1967—69 гг., т. е. в период максимума солнечной активности [2, 3]. Орбиты спутников позволяли проводить измерения на высотах от 200 до 1350 *км* над поверхностью Земли в области географических широт от 49° N до 49° S. Эксперименты на каждом спутнике продолжались около 5 месяцев в зимнее и весеннее время года.

На борту ИСЗ были установлены два супергетеродинных приемника, каждый из которых работал на трех фиксированных частотах в диапазоне от 15 до 45 *кГц*. Чувствительность приемников составляла 2—4 *мкВ*, полоса пропускания в зависимости от частоты настройки — 200—500 *Гц*.

Антенная система СДВ диапазона, установленная на борту каждого спутника, состояла из четырех штыревых антенн длиной 15 *м* каждая. Две антенны подключались ко входам приемников, а две другие служили противовесом и были соединены с корпусом ИСЗ. Антенны располагались под углом 90° друг к другу в плоскости, перпендикулярной продольной оси симметрии спутника. Для обеспечения изотропности диаграммы направленности антенн спутник после вывода на орбиту был

закручен вокруг своей продольной оси с частотой вращения 0,25 оборот/с.

Антенны были связаны со входными цепями приемников через конденсаторы небольшой емкости, что значительно уменьшило влияние емкости антенны, зависящей от параметров ионосферной плазмы, на амплитудные характеристики приемников.

Для непрерывной записи результатов измерений на протяжении витка на борту спутников были установлены запоминающие устройства. В качестве источников СДВ сигналов использовались следующие радиостанции, расположенные на территории СССР (см. табл. 1).

Таблица 1

Радиостанция	Частота, кГц	Географические координаты	
		долгота	широта
Алгазы	16,1	77°11' E	43°50' N
Самарга	31,85	138°48' E	47°18' N
Владивосток	42,85	131°53' E	43°08' N

Для надежности выделения сигналов радиостанций на фоне помех эти сигналы модулировались по амплитуде и имели вид чередующихся посылок длительностью 5 с и пауз длительностью 3 с. Начало каждого импульса привязывалось к секундным меткам точного времени, что позволяло измерять время группового запаздывания сигнала на пути его распространения от радиостанции до ИСЗ. Анализ точности измерения величины напряженности поля E сверхдлинных радиоволн в ионосфере при помощи аппаратуры, установленной на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259», показал, что максимальная относительная ошибка при определении значений E не превышала 30—40%.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ИХ СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В результате экспериментов на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» был осуществлен прием в ионосфере сигналов наземных радиостанций на всех указанных выше частотах в различное время суток и года. Измерения величины напряженности поля СДВ в ионосфере были проведены как при прохождении спутников над зонами расположения радиостанций, так и в магнитосопреженных областях.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что на основе использованной в расчетах ночной модели нижней ионосферы (кривая 2 на рис. 2 из работы [1]) можно удовлетворительно объяснить как сравнительно небольшое ослабление СДВ при их прохождении через ионосферу ночью, так и отсутствие заметной частотной зависимости в рассматриваемом диапазоне.

На рис. 1 приведены типичные результаты измерений (в относительных единицах) в ночное время величины напряженности электрического поля на частоте 16,1 кГц как функции местного времени в районе СДВ радиостанции и расстояния d вдоль поверхности Земли от радиостанции до основания траектории СДВ сигнала, проходящей через точку с координатами спутника. На том же рисунке для сравнения приведены результаты расчетов величины напряженности поля по формулам (10)—(13), (27), (29) и (30) из работы [1]. Как видно из рис. 1, расчетные значения напряженности поля хорошо согласуются с экспериментальными данными на расстояниях до 700—800 км. Расхождение теории с экспериментом на больших расстояниях, по-видимому, объясняется тем, что при расчете интенсивности прямого луча не были учтены дифрак-

ционные поправки вблизи границы зоны тени (см. [1]). Из сравнения расчетной кривой с результатами измерений следует также, что основной причиной наблюдавшихся на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» резких изменений интенсивности СДВ сигналов в ночное время является интерференция нескольких лучей.

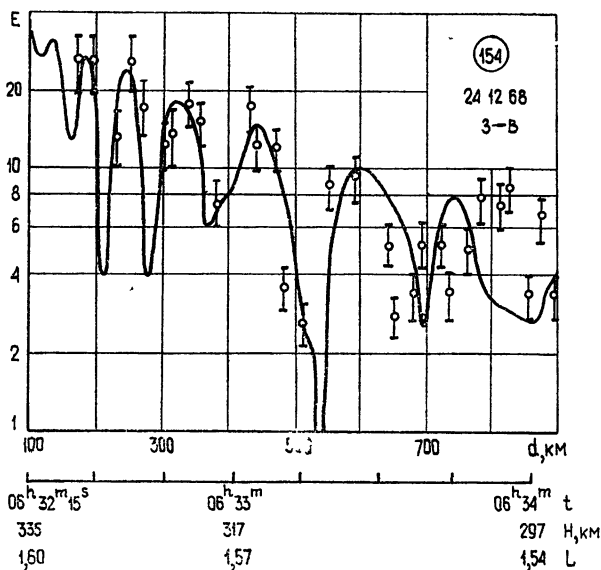


Рис. 1. Результаты расчета (сплошная кривая) и экспериментальные значения (точки) напряженности поля E частоты $16,1 \text{ кГц}$ в относительных единицах для 154-го витка полета ИСЗ „Космос-259“;

d — расстояние вдоль поверхности Земли от радиостанции до основания траектории СДВ сигнала, проходящей через точку с координатами ИСЗ; t — местное время в районе СДВ радиостанции; H — высота полета ИСЗ, L — параметр геомагнитной оболочки.

Аналогичные результаты получены для ночной ионосферы на частотах $31,85$ и $42,85 \text{ кГц}$.

Измерения величины напряженности поля E наземной СДВ радиостанции в ионосфере, выполненные в дневное время, подтвердили результаты теоретических расчетов (см. рис. 3 из работы [1]). Измеренные днем значения E существенно меньше, чем ночью. Кроме того, как показал анализ экспериментальных данных, величина напряженности поля СДВ в ионосфере сильно зависит от зенитного угла Солнца [4]. На рис. 2 представлены экспериментальные значения напряженности поля на частоте $16,1 \text{ кГц}$ (в относительных единицах), полученные в зимне-весеннее время на расстоянии $d=800 \text{ км}$ от радиостанции, в зависимости от зенитного угла Солнца χ . Величины E найдены путем усреднения нескольких измерений в интервале значений $d = 750 \div 850 \text{ км}$ к востоку или западу от радиостанции. Все дневные сеансы ($\chi < 90^\circ$) проводились при $H > 500 \text{ км}$, когда влияние высоты полета ИСЗ на интенсивность принятых сигналов было несущественным.

Приведенную на рис. 2 экспериментальную зависимость $E(\chi)$ можно аппроксимировать функцией

$$\lg E = -1,8 \cos \chi + 0,05, \quad (1)$$

график которой показан на том же рисунке пунктирной линией. Если экстраполировать полученную зависимость в область меньших зенит-

ных углов, то для $\chi = 30^\circ$ получим значения E , соответствующие летнему полдню.

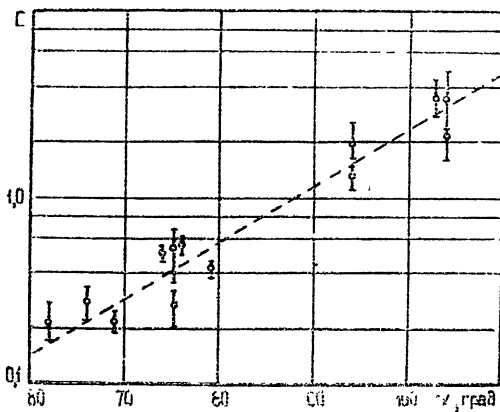


Рис. 2.

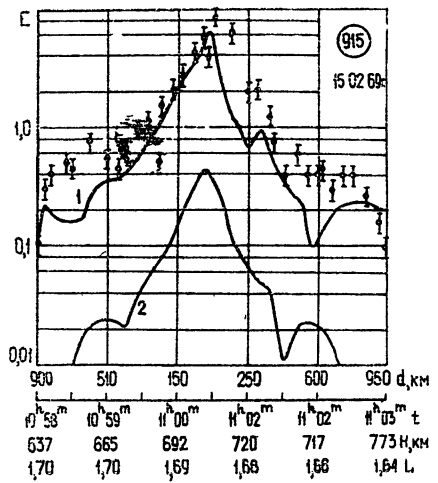


Рис. 3.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты измерений величины напряженности электрического поля (в относительных единицах) на частоте $16,1 \text{ кГц}$ в дневное время зимой. Расчетная кривая 1 соответствует модели ионосферы, характерной для зимнего полдня ($\chi \approx 70^\circ$). Эта модель [5] показана кривой 3 на рис. 2 из работы [1]. Как видно из рис. 3 результаты расчетов для зимнего профиля распределения электронной концентрации хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для сравнения на том же рисунке приведены результаты расчетов для летнего полдня (кривая 2). При этом использовалась модель ионосферы, показанная кривой 1 на рис. 2 из работы [1]. Расчетные значения напряженности поля E для летнего сезона примерно на порядок меньше, чем для зимнего, что соответствует найденной экспериментально зависимости E от зенитного угла Солнца (см. (1)). Из сравнения профилей электронной концентрации для летнего и зимнего полдня следует, что на средних широтах электронная концентрация в нижней ионосфере (на высотах до $100\text{--}120 \text{ км}$) уменьшается в $6\text{--}8$ раз при возрастании зенитного угла Солнца от 30° до $60\text{--}70^\circ$. Результаты измерений напряженности поля СДВ в ионосфере можно использовать для оценки вариаций параметров нижней ионосферы.

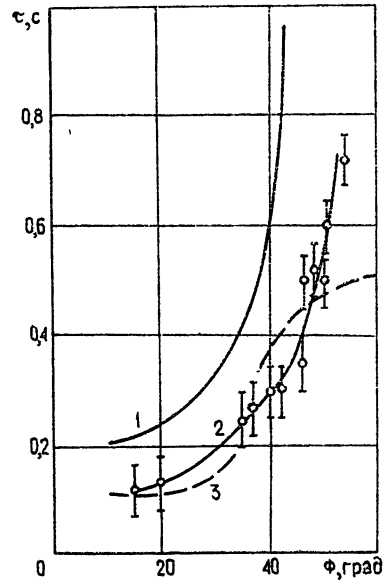
Измерения на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» показали, что вблизи геомагнитного экватора имеет место резкое уменьшение напряженности поля сигналов СДВ радиостанции, одной из причин которого является отмеченная в [1] широтная «отсечка» прохождения СДВ в ионосферу.

При проведении измерений в ночное время на высоте $300\text{--}400 \text{ км}$ в окрестности геомагнитной широты $8\text{--}10^\circ \text{ S}$ наблюдалось уменьшение амплитуды сигнала частоты $16,1 \text{ кГц}$ по крайней мере на 20 дБ при изменении расстояния d вдоль поверхности Земли всего лишь на 50 км . В случае движения спутника к югу область «отсечки» сигнала простиралась до геомагнитной широты $23\text{--}25^\circ \text{ S}$, причем после выхода из области «отсечки» наблюдался медленный рост амплитуды сигнала. Положение южной границы «отсечки» и характер поведения сигнала вблизи нее удовлетворительно согласуются с расчетными данными, приведен-

ными на рис. 4 из статьи [1]. В рассматриваемом случае прием сигнала был возможен при значении $D \gg 10^{-4}$, откуда на основании кривой 2 рис. 4, соответствующей скользким углам падения на ионосферу ($\theta = 80^\circ$), получаем расчетное значение южной границы «отсечки»: $\Phi \approx 22^\circ S$. В то же время наблюдавшееся экспериментально положение северной границы «отсечки» не совпадает с расчетным. Причины указанного расхождения требуют дополнительного анализа и возможно объясняются особенностями траекторий распространения СДВ сигнала на пути от точки входа луча в ионосферу до высоты полета ИСЗ [6]. Экспериментально подтверждено также наличие азимутальной зависимости интенсивности СДВ сигналов, принятых в ионосфере. Сопоставление результатов измерений величины напряженности электрического поля с данными об ориентации бортовых СДВ антенн относительно вектора магнитного поля Земли H_0 показало, что плоскость поляризации электрического вектора волны перпендикулярна H_0 .

Рис. 4. Результаты расчетов (кривые 1—3) и измерений (точки) времени группового запаздывания τ сигналов частоты 16,1 $\mu\text{Гц}$ в зависимости от геомагнитной широты Φ приема:

1—расчет для модели 1 распределения электронной концентрации в магнитосфере (см. текст), 2—расчет для модели 3, 3—расчет для модели 2.



Сравнение результатов измерений, проведенных над СДВ радиостанцией и в магнитосопряженной области, показало, что основное ослабление СДВ в ионосфере имеет место на высотах до 200 км над поверхностью Земли. Величина напряженности поля СДВ сигналов в магнитосопряженной области всего лишь на 3—5 дБ меньше соответствующей величины для сигналов, принятых на той же частоте и в то же время суток над зоной расположения радиостанции. Для магнитосопряженной области характерна отмеченная выше интерференционная структура поля в ночное время (см. рис. 1). Таким образом, картина поля СДВ, наблюдаемая в ионосфере над зоной расположения радиостанции, как бы переносится вдоль траекторий распространения СДВ сигналов в магнитосфере (с небольшим уменьшением амплитуды) в магнитосопряженную область.

Из рассмотрения особенностей распространения СДВ в магнитосфере Земли (см. разд. 3 статьи [1]) следует, что ответить на вопрос о типе траектории СДВ сигнала в магнитосфере невозможно без анализа экспериментальных данных.

В процессе экспериментов на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» была исследована зависимость времени группового запаздывания τ сигнала частоты 16,1 $\mu\text{Гц}$ от геомагнитной широты Φ приема в магнитосопряженной области. На рис. 4 приведены экспериментальные значения τ , полученные в ночное время для различных значений Φ , и расчетные зависимости $\tau(\Phi)$ для следующих моделей распределения электронной концентрации в магнитосфере Земли.

1) Диффузно-равновесная модель из работы [7], соответствующая ночной ионосфере (ионный состав на высоте 500 км: 97,84% ионов O^+ , 2% ионов He^+ и 0,16% ионов H^+ ; температура электронов и ионов $T = 1000$ К; электронная концентрация на высоте 300 км $N = 1,8 \cdot 10^5$ см⁻³). Указанная модель не учитывает широтные градиенты электронной концентрации в ионосфере.

2) Диффузно-равновесная модель из работы [8], близкая по составу ионов на высоте 500 км и другим параметрам к модели 1. Для указанной модели принят во внимание широтный градиент электронной концентрации (при изменении геомагнитной широты от 35 до 60° величина N на высоте 1000 км уменьшается примерно на порядок).

3) Модель, для которой имеют место уплотнения ионизации, ориентированные вдоль геомагнитных силовых линий (так называемые магнитоионные каналы).

Интегрирование системы уравнений (24), (25) из работы [1] для модели 1 показало, что траектория СДВ сигнала не симметрична относительно плоскости геомагнитного экватора. При приближении траектории к геомагнитному экватору угол между вектором волновой нормали и направлением геомагнитного поля становится близок к $\pi/2$, а групповая скорость СДВ сигнала резко уменьшается. В магнитосопряженной области для такого типа распространения характерно аномально большое время группового запаздывания, которое для $f = 16,1$ кГц и $\Phi = 50^\circ$ достигает 3,2 с (аналогичные результаты были получены в работе [8]). Как видно из рис. 4, зависимость $\tau(\Phi)$ для указанной модели (кривая 1 на рис. 4) не соответствует экспериментальным данным, согласно которым для $\Phi = 50^\circ$ величина τ не превышает 0,7 с.

Существенно отличается от результатов экспериментов на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» расчетная зависимость $\tau(\Phi)$ для модели 2 (кривая 3 на рис. 4), хотя введение широтного градиента электронной концентрации приводит к большей симметрии траектории относительно плоскости геомагнитного экватора (см. [8]).

Как видно из рис. 4, хорошее согласие с экспериментальными данными обнаруживают только результаты расчета $\tau(\Phi)$ для траекторий распространения СДВ сигнала по уплотнениям ионизации, ориентированным вдоль линий магнитного поля Земли (см. кривую 2, которая получена для дипольной аппроксимации магнитного поля).

Полученное в разд. 3 статьи [1] расчетное значение ослабления величины напряженности поля сигнала частоты 16,1 кГц, распространяющегося вдоль такой траектории (2—3 дБ), также согласуется с результатами измерений на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» (3—5 дБ).

Как известно [9], прием в магнитосопряженной области СДВ сигналов, движущихся в магнитосфере вдоль уплотнений ионизации, ориентированных геомагнитным полем, возможен только на частотах $f \leq \leq f_H^{\min}/2$, где f_H^{\min} — минимальное значение пирочастоты электронов на пути распространения сигнала (в вершине траектории).

В случае разрежений ионизации частота сигнала, распространяющегося в магнитосфере по замкнутой траектории, должна удовлетворять неравенству $f \leq f_H^{\min}$.

Орбиты спутников «Космос-142» и «Космос-259» пересекали геомагнитную оболочку $L=3$, на которой условие $f = f_H^{\min}/2$ выполняется для частоты 16,1 кГц, что позволило дать ответ на вопрос о характере неоднородностей ионизации, ориентированных геомагнитным полем. На рис. 5 схематично показано пересечение орбиты спутника «Космос-259» с геомагнитной оболочкой $L=3$ на 645-м витке полета. Точки пересечения определяют границы участка орбиты в южном полушарии, для ко-

того $f > f_H^{\min}/2$. Заштрихованные прямоугольники в нижней части рисунка соответствуют зонам приема сигнала частоты 16,1 кГц, излученного наземной радиостанцией, расположенной в северном полушарии. Как видно из рис. 5, прием сигнала прекращался на участке орбиты, который находился вне оболочки $L = 3$. Небольшое расхождение расчетных границ зоны приема с результатами эксперимента объясняется тем, что в расчете была использована дипольная модель магнитного поля Земли, несколько отличающаяся от реального поля.

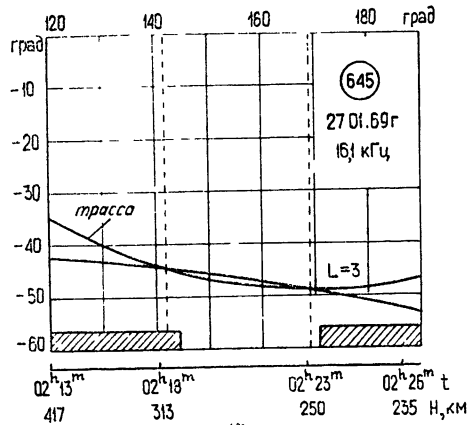


Рис. 5. Схема приема сигнала частоты 16,1 кГц в южном полушарии на 645-м витке полета ИСЗ «Космос-259».

Заштрихованные прямоугольники соответствуют участкам приема сигнала, по осям отложены географические координаты, остальные обозначения аналогичны рис. 1.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что СДВ сигналы, принятые на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259» в магнитосопряженной области (при $1,2 < L < 3$), распространялись в магнитосфере Земли вдоль уплотнений ионизации, ориентированных геомагнитным полем.

Эксперименты на ИСЗ «Космос-142» и «Космос-259», в процессе которых впервые были выполнены измерения в ионосфере напряженности поля наземных СДВ радиостанций на трех достаточно разнесенных частотах 16,1, 31,85 и 42,85 кГц, позволили получить следующие результаты.

1. Проведенные эксперименты подтвердили основные результаты теоретических исследований: явление широтной «отсечки» вблизи геомагнитного экватора, существенные различия частотной зависимости коэффициента прохождения и интерференционной структуры поля в ионосфере в дневное и ночное время и т. д.

2. В результате анализа экспериментальных данных, полученных в дневное время, обнаружена зависимость величины напряженности поля СДВ в ионосфере от зенитного угла Солнца, с которым связаны вариации параметров нижней ионосферы. Установлено, что на средних широтах электронная концентрация на высотах до 100—120 км увеличивается в 6—8 раз при изменении зенитного угла Солнца от 60—70° (зимний полдень) до 30° (летний полдень).

3. Анализ характеристик СДВ сигналов (амплитуды, времени группового запаздывания, интерференционной структуры), принятых на спутниках «Космос-142» и «Космос-259» в магнитосопряженных (по отношению к радиостанциям) областях, показал, что распространение сигналов в магнитосфере происходило вдоль уплотнений ионизации, ориентированных геомагнитным полем. Основное ослабление СДВ в ионосфере имеет место на высотах до 200—300 км над поверхностью Земли. Дополнительное ослабление СДВ сигналов в магнитосфере при

их движении в магнитосопряженную область составляет всего лишь 3—5 ∂ Б.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность М. А. Колосову, А. Е. Башаринову за интерес к работе и ценные замечания, а также Д. С. Лукину и Ю. Г. Спиридонову за помощь, оказанную при расчете траекторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Аксенов, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 18, № 9, 1333 (1975).
2. В. И. Аксенов, Б. А. Дубинский, Л. А. Жекулин, З. Я. Киселева, И. В. Лишин, В. А. Макаров, Л. Н. Михайлов, Космические исследования, 8, вып. 4, 571 (1970).
3. V. I. Aksenov, L. A. Zhekulina, Space Research, 11, 1299 (1971).
4. В. И. Аксенов, М. В. Назарова, сб. Низкочастотные волны и сигналы во внешней ионосфере, Апатиты, 1974, стр. 91.
5. Г. Несторов, Геомагнетизм и аэронавигация, 12, № 1, 44 (1972).
6. R. R. Scarabucci, J. Geophys. Res., 75, № 1, 69 (1970).
7. I. Kimura, Radio Sci., 1, № 3, 269 (1966).
8. R. R. Scarabucci, Technical Report 3418-2, Radioscience Lab., Stanford University, 1969.
9. R. A. Helliwell, Whistlers and Related Ionospheric Phenomena, Stanford Univ Press, 1965.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

INVESTIGATION OF PROPAGATION OF VERY LONG RADIO WAVES IN THE IONOSPHERE OF THE EARTH. II. RESULTS OF THE EXPERIMENTS BY „KOSMOS-142“ AND „KOSMOS-259“

V. I. Aksenov

The results of experimental investigations of ionosphere radio wave propagation at 16.1, 31.85 and 42.85 kHz made by artificial satellites „Kosmos-142“ and „Kosmos-259“ are presented. Basic theoretical conclusions: the latitude cut-off phenomenon near the geomagnetic equator, an essential difference in the frequency dependence of the transmission coefficient and interference field structure in the ionosphere at the day and nighttimes, etc. are confirmed by the experiment. The dependence of the VLF field intensity in the ionosphere on the zenith angle of the Sun is discovered. The analysis showed that the middle latitude electron density at the heights up to 100—120 km increases 6—8 times as the zenith angle of the Sun changes from 60—70° to 30°. As a result of investigations of the magneto-conjugated VLF-signal characteristics (amplitude, group delay time etc.), VLF propagation in the magnetosphere occurs along higher-density ionization regions oriented by the geomagnetic field.