

УДК 550.388.2

ВЛИЯНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

*А. Н. Баранец, Н. Ф. Благовещенская,
Т. Д. Борисова, В. А. Бубнов*

Рассмотрены вариации характеристик наклонного зондирования ионосферы на субавроральной трассе протяженностью 9,0 тыс. км при различных геофизических условиях. Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных ионограмм наклонного зондирования.

Вопросам изучения особенностей распространения декаметровых радиоволн методом наклонного зондирования ионосферы (НЗ) в высоких широтах посвящено значительное количество работ, например [1-6]. Тем не менее в большинстве из них анализировались данные НЗ на трассах длиной до 4,0—5,0 тыс. км, результаты же исследований на протяженных трассах ($D > 8,0$ тыс. км) малочисленны и разрозненны. Сопоставление экспериментальных и расчетных ионограмм НЗ также было проведено только для ограниченных условий [7].

Основной целью данной работы является изучение влияния геофизических факторов, включая магнитно-ионосферные возмущения, на распространение декаметровых волн на протяженной трассе по данным НЗ, а также сопоставление экспериментальных и расчетных ионограмм НЗ при различных условиях распространения радиоволн (сезон, время суток).

Экспериментальные исследования проводились методом наклонного зондирования ионосферы на субавроральной трассе широтного направления протяженностью 9,0 тыс. км. Исследования осуществлялись с помощью автоматической ионосферной станции «Сойка» в период с ноября 1981 г. по август 1982 г. Было проведено шестьдесят суточных сеансов зондирования в диапазоне частот 6—32 МГц при съеме ионограмм один раз в час, а также 24 дополнительных сеанса, когда ионограммы НЗ снимались в ежеминутном режиме в течение 2—3 часов в сутки. Регистрация ионограмм велась на киноплёнку.

Для анализа экспериментальных ионограмм НЗ привлекались данные вертикального зондирования ионосферы (ВЗ), магнитно-вариационных станций и риометров, что способствовало комплексному решению поставленной задачи и получению научно-обоснованных выводов и рекомендаций. Рассмотрим основные результаты.

Вариации диапазона рабочих частот. Для анализа суточных вариаций максимально и минимально наблюдаемых частот на ионограммах НЗ (МНЧ и ННЧ) весь объем экспериментальных данных был разделен по сезонам: зима, равноденствие и лето. Кроме того, для каждого сезона проводилось разбиение данных на две группы в зависимости от степени возмущенности магнитного поля Земли. В первую группу включены данные, полученные в магнитоспокойные периоды, планетарный индекс магнитной активности $K_p < 3$, а во вторую группу — данные, полученные в магнитовозмущенные периоды, $K_p \geq 3$. Далее для каждой из шести групп экспериментальных данных (три сезона, два уровня магнитной активности) проводилось определение медианных значений МНЧ и ННЧ.

В табл. 1 приведены медианные значения максимально наблюдаемых частот МНЧ, наиминших наблюдаемых частот ННЧ и количества лучей N на ионограммах НЗ, полученные по экспериментальным данным, для различных сезонов, уровней магнитной возмущенности и времени суток. В этой же таблице представлены расчетные значения МНЧ, ННЧ и N . Анализ расчетных данных НЗ и их сопоставление с экспериментальными результатами будут проведены ниже.

Экспериментальные зависимости МНЧ от времени суток показывают, что суточный ход МНЧ наиболее заметно выражен в зимний период и равноденствие. Максимальные значения МНЧ при спокойных магнитных условиях наблюдались с 14 до 20 часов московского декретного времени (МДВ) зимой, а в равноденствие этот максимум был несколько смещен в сторону более поздних вечерних часов. Характерной особенностью в суточных вариациях МНЧ на исследуемой трассе зимой и в равноденствие являлось наличие ночного максимума, обусловленного влиянием авроральной ионизации на распространение радиоволн. Летом суточный ход практически отсутствовал, что объясняется условиями освещенности трассы.

Влияние магнитной активности во все сезоны в дневные часы проявлялось в уменьшении МНЧ на 2—7 МГц в возмущенные периоды. В ночные часы наблюдалось возрастание МНЧ с ростом степени возмущенности, особенно в зимний период, когда ночной максимум МНЧ был сравним по величине с дневным.

Одной из особенностей распространения радиоволн на трассе в зимний период являлось влияние главного провала ионизации, которое сказывалось в существенном уменьшении МНЧ с 21 до 23 часов МДВ при спокойных магнитных условиях и с 19 до 21 часа МДВ в возмущенные периоды.

Суточный ход ННЧ в основном повторял вариации МНЧ. С ростом магнитной активности во все сезоны ННЧ повышались.

Оценка многолучевости. Анализ ионограмм наклонного зондирования ионосферы показал, что на исследуемой протяженной радиотрассе наблюдалась отчетливо выраженная модовая структура сигналов. Наблюдалась следующие основные способы распространения: многократные отражения от слоя F_2 , с числом отражений от трех до восьми, комбинированные способы распространения, включающие различные комбинации отражений от слоев E , F_1 и F_2 , способы распространения лучом Педерсена и нестандартные механизмы распространения, к числу которых относились случаи с «боковым» распространением, прямым ионосферным рассеянием и волноводные.

Необходимо отметить, что на исследуемой трассе протяженностью 9,0 тыс. км наблюдалось существенно большее многообразие способов распространения, чем было обнаружено при исследованиях методом НЗ на трассах протяженностью менее 4,0 тыс. км [¹⁻³].

Максимальные задержки между лучами по времени (относительное запаздывание между первым и последним лучами принятого сигнала) наблюдались в зимний период с 15 до 21 часа МДВ, в равноденствие с 15 до 02 часов МДВ и летом — с 00 до 03 часов МДВ и достигали значений 2,5—5,5 мс. На ионограммах НЗ в некоторых случаях отмечались механизмы распространения верхним лучом (луч Педерсена). Луч Педерсена чаще регистрировался в периоды равноденствия и лета, чем зимой. Наибольшая вероятность появления луча Педерсена (до значений $P=0,5$) по данным НЗ наблюдалась с 19 до 23 часов МДВ.

Количественно степень многолучевости можно оценить с помощью коэффициента использования диапазона частот по допустимой многолучевости k_m , который определяется отношением суммы полос частот однолучевых участков на ионограмме НЗ к разности между МНЧ и ННЧ [⁸]:

$$k_m = \sum_{(i)} \Delta f_i / (\text{МНЧ} - \text{ННЧ}) . \quad (1)$$

Таблица 1

Условия распространения радиоволн		Экспериментальные данные по НЗ								Расчетные параметры НЗ									
		$K_p < 3$				$K_p > 3$													
		МНЧ, МГц	ННЧ, МГц	N	МНЧ, МГц	ННЧ, МГц	N	МНЧ, МГц	ННЧ, МГц					N					
Зима	Время суток, ч МДВ																		
	04.00	10,5	6,0	1	18,5	11,0	1	10,0	6,0	2	10,0	6,0	2						
	10.00	13,5	7,0	1	20,5	8,0	1	9,5	7,0	3	9,5	7,0	1						
	16.00	31,0	17,0	4	21,5	16,5	4	27,0	13,0	2	27,0	13,0	4						
22.00	17,0	13,5	1	28,0	17,0	1		8,0	2	10,0	8,0	1							
Равноденствие	04.00	17,0	7,0	3	19,0	10,5	3	14,5	7,0	3	14,5	7,0	2						
	10.00	20,0	11,0	3	17,5	8,5	3	12	10,0	2	12	10,0	1						
	16.00	24,5	12,0	5	25,0	15,7	5	24,5	13,5	5	24,5	13,5	5						
	22.00	28,0	13,0	7	24,5	11,5	7	20,5	12,0	4	20,5	12,0	5						
Лето	04.00	18,0	10,0	2	19,0	11,0	2	16,0	9,0	1	16,0	9,0	3						
	10.00	22,0	11,0	1	17,5	12,5	1	12,0	10,0	2	12,0	10,0	2						
	16.00	24,0	16,0	1	22,0	17,0	1	21	17,0	1	21	17,0	1						
	22.00	23,0	13,0	4	20,0	16,0	4	18,0	10,0	2	18,0	10,0	2						

Значения k_m могут изменяться от нуля (отсутствие однолучевых участков на ионограмме НЗ во всем диапазоне рабочих частот) до единицы (во всем диапазоне частот наблюдается только однолучевое распространение). В табл. 2 приведены наиболее вероятные значения коэффициента k_m на исследуемой радиотрассе при различной геофизической обстановке.

Таблица 2

Геофизические условия		Зима	Равноденствие	Лето
День, 16—21 МДВ	$K_p < 3$	0,3—0,5	0,2—0,4	0,4—0,6
	$K_p \geq 3$	0,4—0,6	0,3—0,5	0,5—0,7
Ночь, 23—06 МДВ	$K_p < 3$	0,8—1,0	0,2—0,4	0,2—0,5
	$K_p \geq 3$	0,6—0,8	0,3—0,6	0,7—0,9

Нестандартные способы распространения радиоволн. При определенных геофизических условиях на радиотрассе по данным НЗ наблюдались сигналы с отклонением траектории распространения радиоволн от дуги большого круга (боковое распространение). Основными особенностями этих сигналов являлись значительные временные задержки, повышенная диффузность и высокие МНЧ по сравнению с распространением по дуге большого круга. Максимальное число случаев проявления боковых сигналов наблюдалось зимой, когда одна или две области отражения были расположены на ночной стороне. Вероятность возникновения боковых сигналов и величина их временной задержки определяются расположением радиотрассы относительно авроральной зоны, положение которой в свою очередь контролируется уровнем геомагнитной активности и местным временем. Причиной возникновения бокового распространения на протяженной субавроральной трассе, так же как и на радиотрассах длиной до 4,0 тыс. км [1, 6, 8], являются интенсивные неоднородности в F-области ионосферы, расположенные на южной границе авроральной зоны.

Одной из особенностей распространения радиоволн, наблюдавшейся при НЗ на исследуемой трассе, аналогично данным, полученным на трассах, протяженностью до 4,0 тыс. км [8], являлось увеличение МНЧ выше частоты соединения (ЧС) верхнего и нижнего лучей, что обусловлено рассеянием вперед на неоднородностях ионосферы. Наибольшее число случаев рассеяния вперед наблюдалось от 12 до 22 часов МДВ. Максимальное увеличение МНЧ относительно ЧС составляло 14—16%.

В ночные часы зимы и равноденствия по данным НЗ наблюдались волноводные способы распространения, характерными особенностями которых являлись высокие МНЧ (по сравнению со скачковыми механизмами распространения) и отсутствие отклонения временного запаздывания от частоты на высокочастотном участке следа ионограммы. В зимние ночные часы частота появления волноводных механизмов составляла около 50—60%. В периоды равноденствия и лета волноводные моды регистрировались реже, причем в большинстве

случаев, кроме волноводных, на ионограммах НЗ регистрировались скачковые моды.

В летние и равноденственные месяцы на ионограммах НЗ наблюдались случаи однододового распространения верхним лучом (Педерсена). Наиболее часто такие случаи имели место с 09 до 12 ч МДВ и с 18 до 23 ч МДВ.

Анализ механизмов нестандартных способов распространения показал, что в целом вероятность их появления составляет $P=0,2\div 0,4$. Достаточно высокая вероятность появления нестандартных способов распространения объясняется как значительной протяженностью радиотрассы, так и влиянием на ночном участке трассы специфических особенностей авроральной зоны.

Влияние магнитно-ионосферных возмущений. По данным наблюдений методом НЗ на распространение радиоволн на исследуемой трассе оказывали влияние следующие виды магнитно-ионосферных возмущений: внезапные ионосферные возмущения типа SWF, магнитные бури, аномальное поглощение радиоволн типа аврорального поглощения (АА) и поглощения в полярной шапке (РСА). Исследуемая радиотрасса была также подвержена воздействию крупномасштабных особенностей высокоширотной ионосферы (главного провала ионизации, спорадической ионизации в E - и F -областях на ночной стороне авроральной зоны).

Внезапные ионосферные возмущения типа SWF наблюдались в дневные часы, когда радиотрасса полностью или частично проходит в освещенной части Земного шара. Влияние SWF сказывалось в увеличении ННЧ относительно невозмущенных значений на 40—120% в зависимости от условий освещенности трассы и интенсивности SWF.

Воздействие мировых магнитных бурь проявлялось в сужении диапазона рабочих частот (как за счет уменьшения МНЧ, так и вследствие возрастания ННЧ) в освещенные часы суток на 25—50% по сравнению со спокойными условиями. В ночные часы суток, когда трасса подвержена влиянию авроральной ионизации, диапазон рабочих частот сдвигался в высокочастотную область. Количество мод на ионограммах НЗ в периоды магнитных бурь, в основном, уменьшалось. В возмущенные периоды также отмечалось возрастание диффузности во всем диапазоне рабочих частот и во все часы суток по сравнению со спокойными условиями.

Аномальное поглощение радиоволн типов АА и РСА вызывает увеличение ННЧ на 30—120% в зависимости от интенсивности поглощения и взаимного расположения трассы и зоны аврорального поглощения, положение которой в свою очередь контролируется местным временем и уровнем геомагнитной активности.

Воздействие крупномасштабных особенностей высокоширотной ионосферы зависит от сезона, местного времени и степени возмущенности магнитного поля Земли. В ночные часы зимы и равноденствия в магнитовозмущенные периоды наблюдалось возрастание МНЧ на трассе на 30—100% по сравнению со спокойными условиями, обусловленное влиянием спорадической ионизации в E - и F -областях ионосферы корпускулярного происхождения.

Проведение численных расчетов ионограмм НЗ. Расчет ионограмм проводился по программе, реализующей алгоритм вычисления траекторных и энергетических характеристик декаметровых радиоволн на протяженных радиотрассах с учетом горизонтальной неоднородности ионосферы вдоль радиолинии. Алгоритм определения лучевых траекторий декаметровых радиоволн и вычисления в геометрооптическом приближении амплитуды поля, создаваемого точечным источником, основан на приближенном решении системы уравнений геометрической оптики в виде двухмасштабного разложения по малому параметру, связанному с малостью горизонтальных градиентов электронной концентрации ионосферы [9]. Необходимым условием использо-

вания приближенного решения [9] при вычислении траекторных и энергетических характеристик декаметровых радиоволн является сохранение на данной трассе величины фазового интеграла (адиабатического инварианта).

В качестве модели вертикального профиля электронной концентрации ионосферы $N_e(r)$ выбрана модель, описывающая наличие ионосферных слоев $E, F1, F2$ и межслоевых долин EF и $F1F2$. Высотный профиль электронной концентрации $N_e(r)$ представлен квазипараболическим сплайном, состоящим из девяти отрезков.

Исходные данные о состоянии ионосферы (геометрические параметры и критические частоты) на радиолинии являются прогнозируемыми характеристиками [10—12].

Расчет напряженности поля электромагнитной волны в месте приема определяется по формулам, приведенным в [9, 13, 14], с учетом расходимости луча и «столкновительного» затухания.

Ионограммы наклонного зондирования рассчитывались для источника излучения мощностью $P=10$ кВт. Угол выхода лучей изменялся в диапазоне от 0 до 35° с шагом изменения $0,5^\circ$. Шаг интегрирования вдоль поверхности Земли составлял (200—500) км и позволял учесть регулярные изменения параметров ионосферы вдоль трассы распространения.

По программе были проведены численные расчеты ионограмм наклонного зондирования, при этом учитывались регулярные моды распространения (скачковые, рикошетирующие и волноводные), входящие в пункт приема на высоту не более 30 км.

Результаты численных расчетов ионограмм наклонного зондирования (ИНЗ) для трех сезонов (зима, лето, равноденствие) и четырех моментов времени суток (4, 10, 16, 22 ч МДВ) изображены на рис. 1, 2, 3 полыми линиями, сплошными линиями нанесены экспериментально измеренные ИНЗ, параметры которых совпадают с медианными значениями для заданных геофизических условий. По оси ординат отложено относительное время запаздывания группового сигнала.

Различие МПЧ наблюдаемых мод на расчетных и экспериментальных ионограммах привело к тому, что привязка расчетных и экспериментальных ионограмм происходила по наиболее интенсивному нижнему экспериментальному моду и по расчетному моду с наименьшим числом скачков.

Сравнение экспериментальных ионограмм с результатами численных расчетов. Как видно из рис. 1, 2, 3, в целом экспериментально измеренные и полученные в результате численных расчетов ионограммы наклонного зондирования довольно хорошо соответствуют друг другу.

Нижний мод соответствует во всех приведенных случаях трехскачковому $F2$ - или $F1$ (летом)-моду распространения, кроме варианта для 10 часов МДВ летом, в котором нижний мод является четырехскачковым $2F1$ — $2F2$ -модом.

При расчете ионограмм идентифицировались одинаково как скачковый мод, отражающийся от Земли, так и мод, рикошетирующий ниже E -слоя.

Результаты расчетов напряженности поля каждого мода в месте приема показали, что в случае комбинированных способов распространения при наличии скачков с отражением от слоя E уровень сигналов на 20—40 дБ ниже по сравнению с уровнями поля мод, канала Земля—слой $F2$ (или $F1$).

Сравнительный анализ ННЧ на экспериментальных и расчетных ионограммах позволил получить относительный минимальный уровень численных значений напряженности сигнала в месте приема. Отсутствие скачковых модов, распространяющихся в канале Земля—слой E , на ионограммах объясняется значительным затуханием радиоволн в данном канале на протяженной трассе.

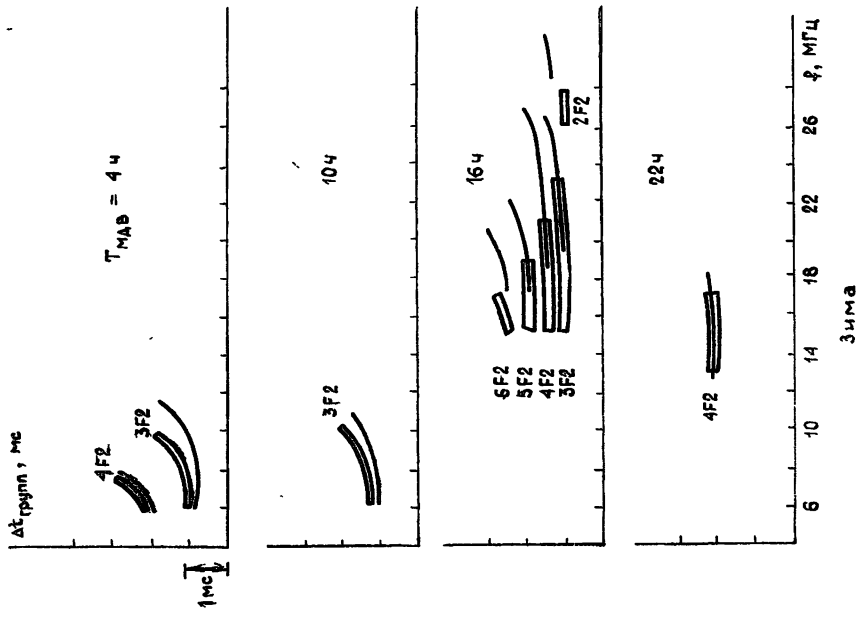


Рис. 1.

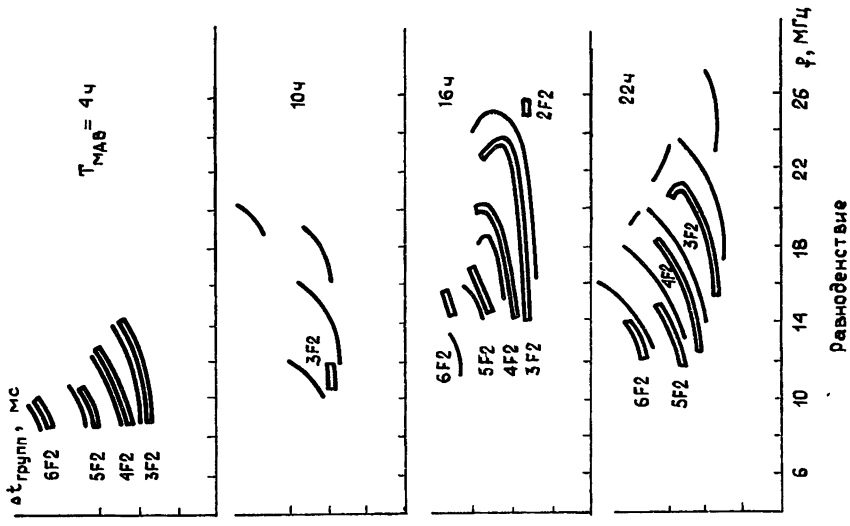


Рис. 2.

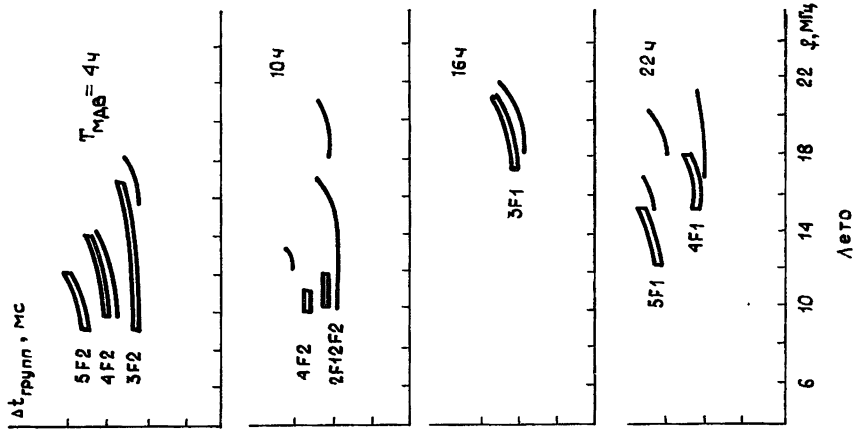


Рис. 3.

Увеличение междумодовых задержек, для приведенных ионограмм НЗ, с увеличением отражений от Земли на экспериментальных ионограммах хорошо соответствует расчетным данным, как и относительное изменение групповой задержки отдельных модов в зависимости от частоты.

Кроме того в условиях равноденствия в 16 и 22 ч МДВ наблюдается луч Педерсена как в расчетных, так и в экспериментально полученных ионограммах.

Наибольшее различие в структуре экспериментальных и расчетных ионограмм наблюдается в 10 ч МДВ во все сезоны: МПЧ экспериментально наблюдаемых ИНЗ значительно выше расчетных значений МПЧ, количество экспериментально наблюдаемых мод больше, по сравнению с численными данными. Дополнительные расчеты траекторных характеристик на частотах выше численно полученной МПЧ для 10 ч МДВ показали, что при расчете распространения радиоволн в субавроральной и авроральной зоне необходимо дополнить модель ионосферы факторами, описывающими особенности авроральной ионосферы (слои E_s , главный среднеширотный провал в F -области). Кроме того необходимо учесть при расчете распространения возбуждение ионосферных каналов распространения за счет рассеяния как на крупномасштабных, так и мелкомасштабных структурах авроральной ионосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bates H. F. Results of the HF forward and backscatter program at College since 1963. Final Report, VAG R-178. — College: Geophys. Inst. Univ. Alaska, 1966. — 92 p.
2. Möller H. G. — Radio Sci., 1967, 2, № 1, p. 77.
3. Наклонное зондирование ионосферы. Сб. статей / Под ред. В. Б. Смирнова — Л.: Гидрометеоздат, 1972, вып. 1.
4. Дриацкий В. М., Смирнов В. Б., Костерин И. Н. Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. — Л.: Гидрометеоздат, 1978, 351, с. 5.
5. Ходжа-Ахмедов Ч. Л., Кашурко М. С. Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. — Л.: Гидрометеоздат, 1978, 351, с. 54.
6. Благовещенский Д. В. Благовещенская Н. Ф. — Геомагнетизм и аэрономия, 1981, 21, № 2, с. 289.
7. Некрасов Б. Ю., Тушенцова И. А., Фишук Д. И., Широков А. В., Шумилов И. А., Цедилина Е. Е. — Геомагнетизм и аэрономия, 1984, 24, № 4, с. 603.
8. Смирнов В. Б., Дриацкий В. М., Ходжа-Ахмедов Ч. Л., Костерин И. Н. — Труды Арктического и Антарктического института. — Л.: Гидрометеоздат, 1975, 322, с. 62.
9. Баранов В. А., Попов А. В. Препринт ИЗМИР АН СССР № 5 (271). — М., 1980.
10. Чернышев О. В., Васильева Т. Н. Прогноз максимально применимых частот ($W=10, 50, 100, 150, 200$). — М.: Наука, 1975.
11. Ануфриева Т. А., Шапило Б. С. Геометрические параметры слоя F2 ионосферы. — М.: Наука, 1976. — 90 с.
12. Заленова Т. И. Препринт ИЗМИР АН СССР № 19 (285). — М., 1980.
13. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980, с. 153.
14. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. — М.: Наука, 1979, с. 185.

Поступила в редакцию
21 апреля 1986 г.

INFLUENCE OF GEOPHYSICAL FACTORS ON OBLIQUE-SOUNDER IONOSPHERE CHARACTERISTICS

A. N. Baranets, N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, V. A. Bubnov

Variations of oblique-sounder ionosphere characteristics (maximum and lowest observed frequencies MOF and LOF, mechanisms of the radio wave propagation, relative time delay between modes and oth.) in a subauroral line 9000 km long are considered for the various geophysical conditions (season, local time, degree of the magnetic activity). Comparison is made between measured and calculated oblique-sounder ionosphere ionograms.