

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОВАЛА ИОНИЗАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Г.А. Загорский, А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия,
gazagorskiy@aari.ru

FEATURES OF THE IONOSPHERIC TROUGH'S INFLUENCE ON RADIO WAVE PROPAGATION

G.A. Zagorskiy, A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, I.M. Egorov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia,
gazagorskiy@aari.ru

Аннотация. В работе приведены результаты наблюдений главного ионосферного провала (ГИП) в широтном ходе электронной концентрации на высотах F_2 -области в различных геомагнитных условиях по данным вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы. Также, дано краткое описание оборудования, его технические характеристики, геометрия радиотрасс.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, главный ионосферный провал (ГИП), наклонное зондирование ионосферы, вертикальное зондирование ионосферы, электронная концентрация.

Abstract. The work presents results of observations of the main ionospheric trough (MIT) in the latitudinal variation of the electron concentration at the height of the F_2 layer in different geomagnetic conditions using an oblique HF ionospheric sounding network. A brief description of the equipment and its technical characteristics is presented. The geometry of the radio tracks is also given.

Keywords: high latitude ionosphere, main ionospheric trough (MIT), oblique sounding, vertical sounding, electron density.

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью субавроральной ионосферы является провал в широтном ходе электронной концентрации N_e на высотах F_2 -области. Главный ионосферный провал (ГИП) — в основном, зимнее ночное явление. Вероятность его появления на освещенной стороне Земли ниже 20 %, чем на затененной (более 80 %). Впервые он был обнаружен по данным спутника Alouette [Muldrew, 1965]. Глубина провала в N_e на высотах F_2 -области может составлять от 3–5 раз до 10 раз. Как правило, северная стенка провала круче экваториальной стенки. Ширина же может колебаться от нескольких градусов до 20° широты. Средняя ширина в ночное время около 10° , утром и вечером увеличивается. Пример профиля ГИП, как функции N_e от геомагнитных координат [Ercha, 2020] представлен на рис. 1. Пунктирной линией обозначен фоновый уровень электронной концентрации, точками T_z , T_m и T_c на кривой электронной концентрации отмечены начало экваториальной стенки провала, минимум N_e — дно провала и северная стенка провала соответственно.

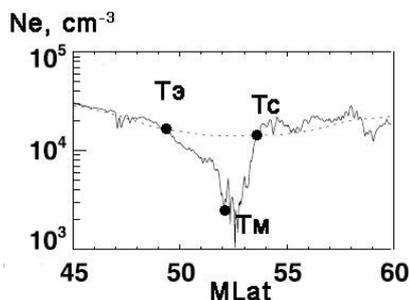


Рис. 1. Профиль ГИП, как функция электронной концентрации от геомагнитных координат

Максимальная широта положения провала достигается в вечерние часы, минимальна ночью

(около 63° инвариантной широты). С увеличением магнитной активности провал сужается и смещается к экватору на $2\text{--}3^\circ$ на единицу Kp -индекса [Брюнелли, Намгаладзе, 2015]. При спокойных геомагнитных условиях ГИП может вытянуться вдоль всей авроральной зоны.

Полярная стенка провала соответствует экваториальной стенке зоны авроральной ионизации, в F - и E -областях ионосферы возрастает N_e , часто образуются спорадические E_s -слои и аномальная ионизация F -слоя. Достаточно крутая полярная стенка провала представляет собой резкий горизонтальный градиент электронной концентрации и влияет на условия распространения радиоволн (РРВ), что проявляется в виде возникновения нестандартных боковых мод [Благовещенский, Жеребцов, 1987].

Образование провала — одно из проявлений ионосферно-магнитосферного взаимодействия, определяющего режим полярной ионосферы в целом, и является значительно более сложным образованием, чем простое снижение N_e в определенном интервале широт.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Положение ГИП оценивалось при помощи данных вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) с использованием ионозонда CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) и эмпирической модели, представленной в [Halcrow, Nisbet, 1977]. Влияние ГИП на характеристики радиосигналов оценивалось на базе станций наклонного радиозондирования ионосферы (НЗИ), расположенных в европейской части Арктической зоны [Рогов и др., 2015]. На рис. 2 показана геометрия радиотрасс, отмечены приемо-передающие пункты и средние точки трасс. Приемо-передающие пункты НЗИ совмещены с пунктами ВЗИ. Четыре трассы

расположены вдоль провала ионизации и одна Санкт-Петербург (НИС «Горьковская») — Мурманск (с. Ловозеро) поперек. Комплексы наклонного радиозондирования используют сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы), наблюдения проводятся в диапазоне частот 2–29 МГц. Для оценки положения и влияния ГИП были проанализированы 30-минутные данные НЗИ и ВЗИ в зимние периоды в годы минимума цикла солнечной активности (2019–2021 гг). Рассматривались отдельно спокойные, слабовозмущенные и возмущенные геомагнитные условия. В качестве спокойных условий выбирались дни при $\Sigma Kp < 15$, слабо-возмущенных $15 \leq \Sigma Kp \leq 24$ и возмущенных дней $\Sigma Kp > 24$.

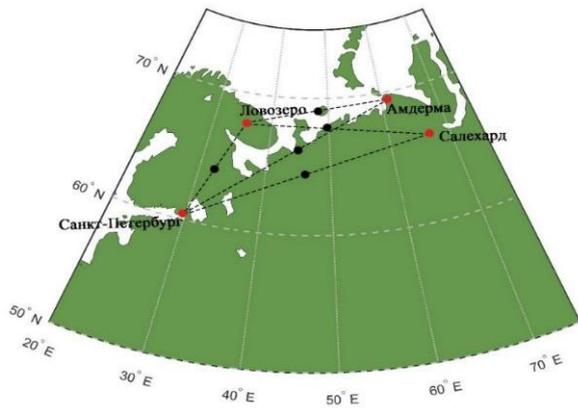


Рис. 2. Трассы наклонного зондирования ионосферы. Красными точками обозначены прямо-передающие пункты, совмещенные с ВЗИ, черными — средние точки радиотрасс

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В табл. 1 и 2 приведены результаты вертикального и наклонного радиозондирования в различных геофизических условиях. Данные ВЗ показывают, что значения $foF2$ в послеполуденном секторе снижаются при приближении стенки ГИП к пункту зондирования со скоростью 0,6 – 0,8 МГц/ч. После достижения дна провала, фиксируются минимальные критические частоты суточного хода. Отношение значений $foF2$ в провале к суточному максимуму представлено в табл. 1.

Приближение полярной стенки отчетливо идентифицируется по ионограммам ВЗ, где появляется трек бокового отражения. По мере приближения момента T_c , действующая высота и предельная частота наклонных отражений уменьшаются.

При возрастании магнитной активности эффект провала в электронной концентрации «размывается», суточный максимум $foF2$ уменьшается, а частоты в провале возрастают. Этот эффект наблюдается на всех пунктах ВЗ. Например, на станции вблизи Санкт-Петербурга в спокойных геомагнитных условиях критическая частота слоя $F2$ уменьшается в 3,5 раза по сравнению с суточным максимумом, а при возмущенных условиях отношение $foF2_{max} / T_m \approx 2,5$. В вечерние часы, особенно при наличии магнитных возмущений, оценить изменение $foF2$ не удалось, по причине наличия сильных отражений от спорадического E -слоя и экранировки $F2$ -слоя.

Таблица 1.

Сопоставление результатов ВЗИ при различных геофизических условиях

Фоновые условия	Санкт-Петербург				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	5,7	1,6		356	
слабовозмущенные	5,2	1,7		306	
возмущенные	4,8	1,9		253	

	Мурманск				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	4,5	1,7	3,1	265	82
слабовозмущенные	4,5	1,8	3	250	67
возмущенные	4,3	2,6		165	
	Амдерма				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	4,4	1,9	3,5	232	84
слабовозмущенные	4,7	2,3	3,7	204	61
возмущенные	4,4	2,4		183	
	Салехард				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	5,2	1,8		289	
слабовозмущенные	5,2	2,5		208	
возмущенные	4,4	2,4		183	

Сопоставление результатов НЗИ при различных геофизических условиях

Фоновые условия	Мурманск - Амдерма				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	8,7	3		290	
слабовозмущенные	8,9	3,9		228	
возмущенные	8,7	5,3	6	164	11
	Мурманск - Салехард				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	11,6	4,5	7,9	258	43
слабовозмущенные	11,4	6	8,6	190	30
возмущенные	9,9	5,6		177	
	Санкт-Петербург - Амдерма				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	15,1	4,4		343	
слабовозмущенные	14,2	4,9	7,8	290	37
возмущенные	12,2	6,4		190	
	Санкт-Петербург - Салехард				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	16,1	4,4		366	
слабовозмущенные	15,4	5,3		291	
возмущенные	13,3	6,6		202	
	Санкт-Петербург - Мурманск				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	9,9	3,2		309	
слабовозмущенные	8,8	4		220	
возмущенные	8,2	3,8		216	

В суточном ходе МНЧ моды 1F2 (табл. 2) наблюдаются идентичные закономерности, как и в ходе f_oF2 при ВЗ. Приближение экваториальной стенки провала к средней точке радиотрассы (точке отражения) вызывает постепенное уменьшение МНЧ. При вхождении точки в днище провала, МНЧ падает в 2,6–3,5 раза по отношению к максимальному значению МНЧ за сутки. Трассы, более высокоширотные, находящиеся в авроральной зоне, подвержены воздействию полярной стенки провала, при прохождении которой через точку отражения МНЧ возрастают. Приближение полярной стенки к трассе вдоль дуги большого круга можно зафиксировать по наличию боковых мод распространения на ионограмме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено воздействие главного ионосферного провала (ГИП) на частотный диапазон распространения диагностических сигналов сети

наклонного радиозондирования ионосферы. Показано, что ГИП оказывает сильное влияние на частотные диапазоны радиотехнических систем, работающих на F-модах распространения. Ширина диапазона частот, в котором возможно проведение сеансов радиосвязи, в течении суток будет изменяться в 2–3 раза и зависеть от геомагнитной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование КВ радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 1988. 527 с.
- Рогов Д.Д., Выставной В.М., Благовещенская Н.Ф. Российская высокоширотная сеть наклонного зондирования ионосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 5–13.
- Aa E., Zou S., Erickson P.J. et al. Statistical Analysis of the Main Ionospheric Trough Using Swarm in Situ

Measurements // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. 125. e2019JA027583. <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>.

Halcrow B.W., Nisbet J.S. A model of *F*2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere // Radio Sci. 1977. V. 12, N. 5. P. 815–820.

Ishida T., Ogawa Y., Kadokura A. et al. Seasonal

variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 6774–6783. <https://doi.org/10.1002/2014JA019996>.

Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 11. P. 2636–22650.