

ТӨМЕНГІ ИОНОСФЕРАДАҒЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ТОЛҚЫНДАРДЫҢ 1 КГц-ТЕН 10 МГц-КЕ ДЕЙІНГІ ЖИІЛІКТІҢ КЕҢ ИНТЕРВАЛЫНДАҒЫ ӘЛСІРЕУІ**Несіпбай Айгүл Бақытқызы**

магистрант, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қаласы

Бақтыбеков Қазбек Сүлейменович

кафедрасының физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, РЭТ Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қаласы

ATTENUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE LOWER IONOSPHERE OVER A WIDE RANGE OF FREQUENCIES FROM 1 KHZ TO 10 MHZ**Aigul Nesipbay**

Master's student of S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan city

Kazbek Baktybekov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of RET
Kazakh Agrotechnical University named after S.
Seifullin, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan city

Аннотация. Ионосфераға әсер етудің қазіргі заманғы станциялары ("қыздыру стэндтері") пайдаланатын 1 кГц – 10 МГц жиіліктерінің кең интервалында төменгі ионосферада электромагниттік толқындардың жұтылу және шағылысу коэффициенттерінің сандық есептері жүргізілді. Анықтау үшін есептеулер HAARP (Аляска, АҚШ) станциясына тән шарттар үшін жүргізілді. Күндізгі жағдайларда gyro және жоғарғы-гибридті резонанстар жиілігіне жақын екі негізгі жұтылу жолағы бөлінетіні көрсетілген. Түнде бұл жолақтар бір кең жолақты құяды. Түнгі уақытта 2 кГц жиілігіне жақын шағылысу және жұтылу коэффициенттерінің минимумы анықталды.

Abstract. Numerical calculations of the absorption and reflection coefficients of electromagnetic waves in the lower ionosphere over a wide frequency range of 1 kHz - 10 MHz, used by modern ionosphere exposure stations ("heating stands"), were performed. For definiteness, the calculations were carried out for the conditions typical for the HAARP station (Alaska, USA). It is shown that in daytime conditions two main absorption bands are distinguished near the frequencies of gyro and upper hybrid resonances. At night, these bands practically merge into one broadened band. At night, a minimum of reflection and absorption coefficients near a frequency of 2 kHz was detected.

Түйінді сөздер: төменгі ионосфера, шағылысу және жұтылу коэффициенттері, қыздыру стендтері, плазмалық резонанстар.

Keywords: lower ionosphere, reflection and absorption coefficients, heating stand, plasma resonances.

Кіріспе

Соңғы онжылдықта радиациясы төмен жиілікте (LF) модуляцияланған жер үстіндегі бірнеше қуатты қысқа толқындық таратқыштар (HF) іске қосылды. Мұндай таратқыштардың («жылыту стендтері») сәулеленуі төменгі ионосферада қарқынды түрде сіңеді, бұл сызықтық емес демодуляция эффектінің пайда болуына және төмен жиілікті толқындардың ионосфера мен Жер-ионосфера толқындарының таралуына әкеледі [1].

Бұл жұмыстың мақсаты типтік жердегі ионосфералық әсер станциясының кең жұмыс жиілігінің диапазонында (1 кГц-ден 10 МГц-ге дейін) ЕМ толқындарының шағылысуы мен сөну сипаттамаларына сандық есептеулер жүргізу. Қажетті кернеуді есептеу үшін екі тәуелсіз әдісті қолданамыз. Біріншісі суық магнитоактивті плазма моделі үшін толқынның күрделі сыну көрсеткіші n -дің қиял бөлігінің биіктігі бойынша интеграцияға негізделген. Бұл әдіс «жоғары жиіліктер» жағдайында, плазма қабатының параметрлері толқын ұзындығында баяу өзгерген кезде ғана қолданылады.

Негізгі қатынастар

Ионосферадағы ЭМ толқындарының таралуына байланысты көптеген құбылыстарды суық плазмалық жуықтау аясында түсіндіруге болады, оның негізгі жорамалы бөлшектердің тиісті жылу қозғалысы болмауы, ал электрондар мен иондар сыртқы өрістерде, соның ішінде толқын өрісінде қозғалуға мәжбүр [2]. Бұл жағдайда плазма квазинейтралды болады, ал оның магниттік қасиеті вакуумның қасиеттерінен өзгеше емес. Жазықтық толқынының күрделі фазалық сыну көрсеткішін ұсынамыз

$$n \equiv |k / k_0| = \mu - i\chi \quad (1)$$

мұндағы $k_0 = \omega/c = 2\pi f/c$ - толқын саны; f - толқын жиілігі; $\omega = 2\pi f$ - дөңгелек жиілік; c - вакуумдағы жарық жылдамдығы.

Магнитоактивті плазма үшін сыну индексі үшін өрнек тіпті бірыңғай сирек кездесетін суық плазма түріндегі ортаның қарапайым моделі үшін күрделі болып көрінеді.

Ресми түрде (1) теңдеудің шешімі қарапайым көрінеді:

$$n^2 = \{B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}\} / 2A. \quad (2)$$

« $\pm$ » белгілері төтенше және қарапайым толқындарға сәйкес келеді. Бөлшектердің соқтығысуын ескеру үшін параметрлерді сәл өзгерту керек. Зарядталған бөлшектердің әр түрі үшін күрделі мөлшерді ұсынамыз

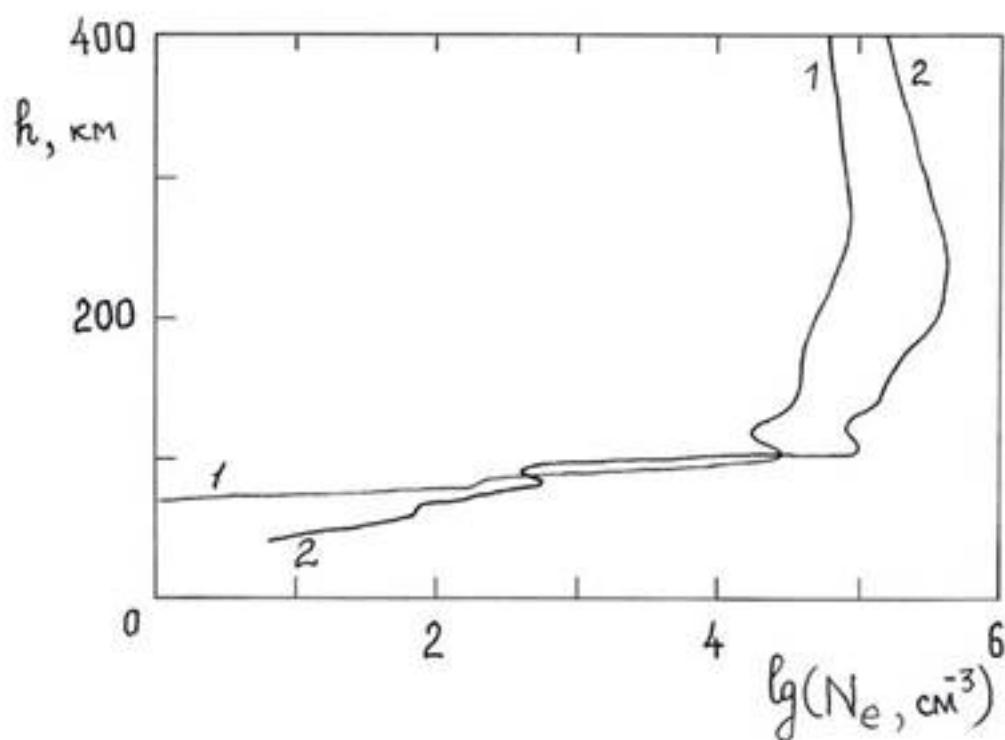
$$U_i \equiv 1 - i\nu_i/\omega \quad (3)$$

мұндағы ν_i - i типіндегі бөлшектердің соқтығысуының тиімді жиілігі. Біз қарым-қатынасты келесі түрде жазамыз:

$$R = 1 - \sum X_i / (U_i + Y_i); \quad L = 1 - \sum X_i / (U_i - Y_i); \quad P = 1 - \sum X_i / U_i. \quad (4)$$

Соқтығулар аз болған жағдайда ($\mu \gg \chi$), таралатын толқынның төмендеуін практикалық есептеулер үшін материалдық теңдеу әдетте қатынастарға негізделеді, ал коллизиялық демпинг дербес ескеріледі.

Ионосфералық биіктікте, мұнда $h \ll R_0$ ($R_0 \approx 6370$ км - жердің орташа радиусы), f_{He} мәні аздап өзгереді. Сонымен, егер 50 км $f_{He} \approx 1,6$ МГц биіктікте болса, онда 200 және 300 км $f_{He} \approx 1,5$ және 1,4 МГц биіктіктерінде. $f_{pe} \sim N_e^{1/2}$, плазмалық жиілігі, яғни төменгі ионосферадағы f_{pe} мәні, керісінше, биіктігімен салыстырмалы түрде тез өзгереді (1-суретті қараңыз).



1 Сурет. Ионосферадағы электрондар концентрациясының биіктік профилдері

Қорытынды

Жоғарыда келтірілген есептеу нәтижелері ионосфералық плазма және геомагниттік өріс параметрлерін үлестірудің нақты модельдері үшін алынған және көрнекі болып табылады. Тәжірибелерді жоспарлау кезінде, мысалы, ионосфераны HF сәулесімен қыздыру немесе олардың нәтижелерін талдау кезінде белгілі бір эксперименттің уақыт кезеңіне сәйкес келетін ионосфера мен геомагниттік өрістің параметрлерін таңдау керек.

Жоғарыда келтірілген есептеу нәтижелері иондық компоненттерді ескерусіз алынды. $F < 1$ кГц жағдайда, әдетте, ионосфералық плазма иондарының әсерін елеусіз қалдыруға болмайды, олар қатынастарды (2) және (4) ескере отырып және деректерді қолдана отырып, түбегейлі қиындықтар туғызбайды. Толқындық теңдеулер иондардың қосылуын да жеңілдетеді.

Қолданылған әдебиеттер:

1. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Численное моделирование прохождения волн очень низкой частоты через магнитоактивную плоскостойкую плазму нижней ионосферы земли. // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. (в печати).
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН. 2007. Т.177. № 12. С.1145-1177. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711a.1245
3. Аксенов В.И., Мошков А.В. О напряженности поля на поверхности земли от источника очень низкой частоты, расположенного в ионосфере. // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 32. № 5. С. 913-919.
4. Брылев Ю.Н., Поддерюгина Н.В., Подливаев И.Ф. Эффективность использования мощных ЭВМ в конструировании вычислительных методов и трактовке результатов расчета ионосферного отражения электромагнитной волны с учетом нелинейного разогрева. Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование». Тезисы докладов. РФЯЦ, Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров, июнь 2002 г.