

В. Н. Козлов, В. М. КоротунНаучно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи»,
Москва, Россия

КЛАССИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН КВ-ДИАПАЗОНА ПО ИОНОСФЕРНЫМ ТРАССАМ

В работе рассмотрена классификация факторов, определяющих прохождение радиоволн КВ-диапазона по ионосферным трассам. Определены регулярные характеристики ионосферного канала передачи информации в КВ-диапазоне. Показана необходимость учета пассивных помех, связанных с воздействием пространственно неоднородной, магнитоактивной, диспергирующей, поглощающей, изменчивой во времени ионосферы на структуру излученного полезного сигнала.

Ключевые слова: международная модель ионосферы, короткие волны, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, внезапные ионосферные возмущения, поглощение полярной шапки, ионосферные бури, массовый выброс короны, спорадический (нерегулярный) слой.

Для цитирования: Козлов В. Н., Коротун В. М. Классификация факторов, определяющих прохождение радиоволн КВ-диапазона по ионосферным трассам // Радиопромышленность. – 2016. – № 4. – С. 106–111.

V. N. Kozlov, V. M. Korotun

NPK «NIIDAR», Moscow, Russia

CLASSIFICATION OF FACTORS DETERMINING THE SW RADIOWAVES PROPAGATING VIA IONOSPHERIC PATHS

The paper deals with classification of factors determining propagation SW band radio waves via ionospheric paths. Regular characteristics of the ionospheric communication channel have been identified in SW band. The necessity was demonstrated for recording passive noise interferences associated with the exposure of spatially inhomogeneous, magnetically active, dispersing, absorbing, changing in time ionosphere on structure of the emitted useful signal.

Keywords: international model of ionosphere, short waves, vertical sounding, oblique sounding, sudden ionospheric disturbances, polar cap absorption, ionospheric storms, coronal mass ejections, sporadic (irregular) layer.

For citation: Kozlov V. N., Korotun V. M. Classification of factors determining the SW radiowaves propagating via ionospheric paths. Radiopromyshlennost, 2016, no. 4, pp. 106–111. (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2016-4-106-111

Регулярные характеристики ионосферного канала передачи информации в КВ-диапазоне

В ионосфере могут существовать 4 области, называемые D, E, F1 и F2 [1, 2, 3]. Ориентировочные высоты следующие: область D – 50–90 км, область E – 90–140 км, область F1 – 140–210 км, область F2 – более 210 км (рис. 1). В течение дневного

времени спорадический слой Es (непостоянный) иногда можно наблюдать в области E, и в определенное время солнечного цикла область F1 не разделена с областью F2, а оба эти слоя объединены в общую область F. В ночное время области D, E и F1 становятся очень бедными на свободные электроны, и только область F2 остается

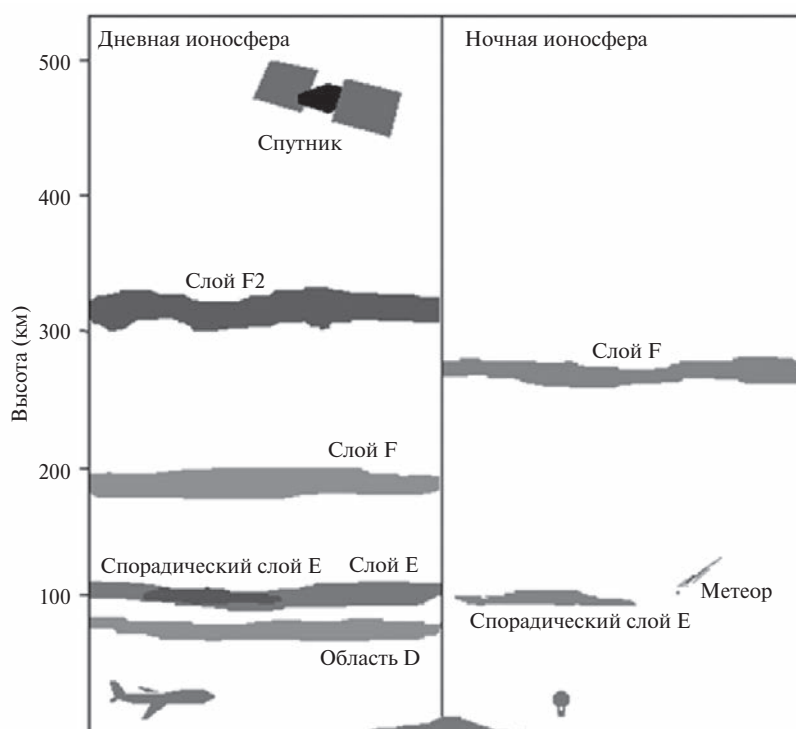


Рисунок 1. Дневная и ночная структуры ионосферы

возможной для связи, Es-слой редко встречается ночью. Только слои E, F1, Es (если присутствует) и область F2 преломляют высокочастотные волны. Область D также важна – хотя и не преломляет ВЧ-радиоволны, но поглощает и ослабляет их. F2 является самой важной областью в распространении высокочастотных радиоволн, так как: она присутствует в течение 24 часов в сутки; высокое расположение обеспечивает максимальную дальность связи и она чаще всего отражает самые высокие частоты в КВ-диапазоне [4].

Самое продолжительное существование свободного электрона – в области F2, что и является одной из причин сохранения этой области и в ночное время. Среднее время существования свободного

электрона в областях E, F1 и F2 составляет около 20 секунд, 1 минуты и 20 минут соответственно.

Вариации в зависимости от солнечного цикла. Солнце проходит через фазы активности, которые влияют на высокочастотную связь, солнечные циклы имеют продолжительность от 9 до 14 лет. При большем количестве радиации, излученной солнцем в периоды максимальной солнечной активности, возникает большее количество электронов в ионосфере, что и позволяет использовать высокие частоты (рис. 2).

Сезонные вариации. Частоты, отражаемые областью E, выше летом, чем зимой. Вариация в частотах области F более сложная. В обоих полушариях частоты F области в полдень вообще достигают

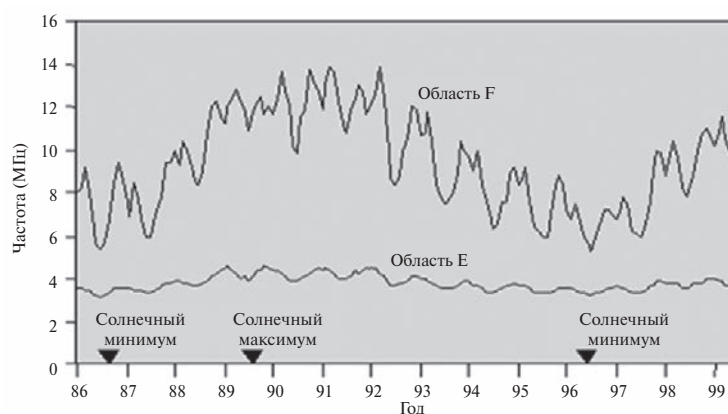


Рисунок 2. Солнечные циклы и сезонная зависимость полуденных критических частот для областей E и F

максимума в момент равноденствий (март и сентябрь). В момент солнечного минимума полуденные летние частоты, как ожидается, в основном выше, чем зимние, но в момент солнечного максимума зимние частоты в некоторых местах могут быть выше, чем летом. Кроме этого, частоты в момент равноденствий (март и сентябрь) выше, чем летом или зимой, как для солнечного максимума, так и для минимума. Наблюдение полуденных зимних частот, часто более высоких, чем летом, называется «сезонной аномалией» [5].

Вариации с широтой. В течение дня и с увеличением широты солнечное излучение воздействует на атмосферу под большим углом, таким образом интенсивность радиации и плотность электронов уменьшается к полюсам. На рис. 3 можно заметить, что дневные частоты области F имеют свой пик не на магнитном экваторе, а в районе от 15 до 20 градусов к северу и к югу от него. Это называется экваториальной аномалией. Ночью частоты достигают минимума в районе 60 широты к северу и к югу от геомагнитного экватора (впадина в средних широтах). Большие отклонения могут происходить около этих районов, что может приводить к большим вариациям в дальности распространения ионосферных волн, которые имеют точки отражения вблизи этих районов.

Суточные вариации. Рабочие частоты обычно выше в течение дня и ниже ночью (рис. 4). С рассветом солнечная радиация порождает электроны в ионосфере и частота увеличивается, достигая своего максимума к полудню.

После полудня частоты начинают уменьшаться из-за уменьшения электронной концентрации, и с вечера области D, E, и F1 становятся

малозначащими. Поглощение ночью уменьшается из-за падения интенсивности области D. В течение ночи также уменьшаются критические частоты, достигая своего минимума перед рассветом.

Вариации в поглощении. Дневное поглощение в области D также изменяется с солнечным циклом, являющимся наибольшим в период солнечного максимума. Поглощение сигнала больше летом и в течение середины дня (рис. 5). Существует вариация в поглощении в зависимости от широты с большим количеством поглощения около экватора и уменьшающимся поглощением к полюсам, при этом увеличение солнечной активности значительно увеличивает поглощение на полюсах. Более низкие частоты поглощаются в большей степени, так что желательно использовать высокие частоты, насколько это возможно.

Возмущения в ионосфере, связанные с солнечными вспышками. Солнечная активность изменяет текущую пространственную структуру ионосферы, определяя тем самым условия прохождения к антенне приемника не только полезного сигнала, но и активных, и пассивных помех, их общую интенсивность и структуру [6, 7, 8]. Ранние эффекты, по шкале времени меньшие суток от начала вспышки, связаны с электромагнитной радиацией и высокоэнергичными частицами. Магнитная буря начинается 2–3 днями позже после вспышки и связана с достижением Земли, строго на южной стороне, магнитного поля, связанного с массовым извержением частиц.

Возмущения омического затухания КВ в ионосфере. Такие затухания КВ-радиосигнала (или поглощения) также называются «световыми затуханиями», или «внезапными ионосферными возмущениями» (ВИБ). Радиация от Солнца во время

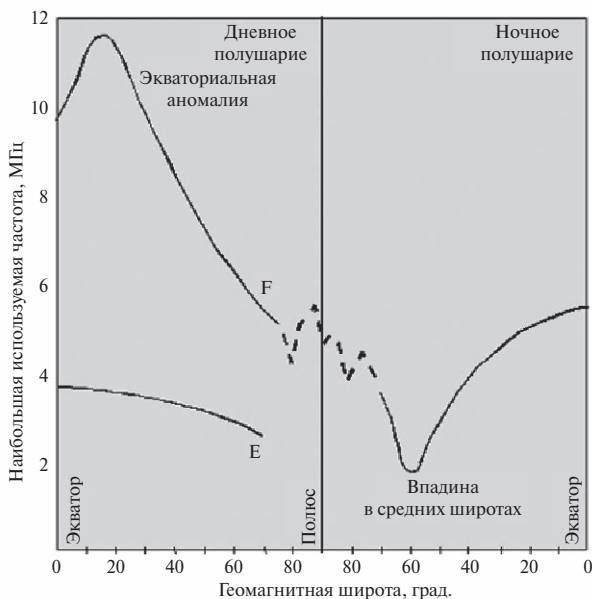


Рисунок 3. График широтных вариаций

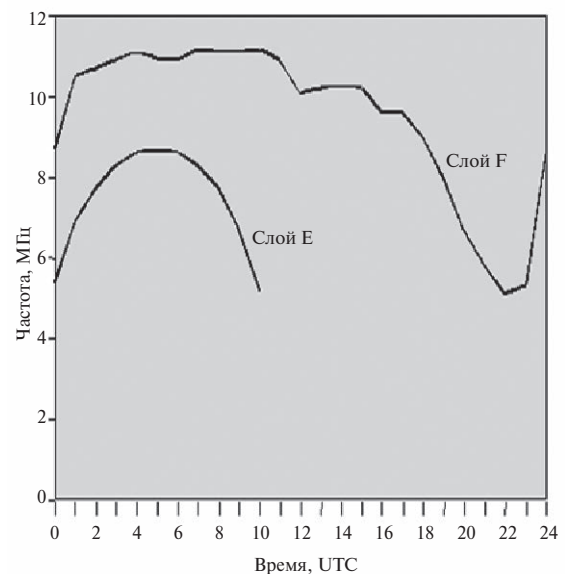


Рисунок 4. Типичный суточный ход критических частот слоев E и F

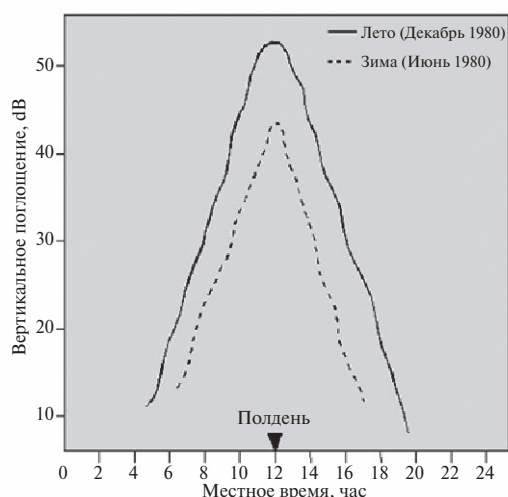


Рисунок 5. Суточные и сезонные вариации в поглощении на частоте 2,2 МГц

больших солнечных вспышек увеличивает ионизацию в области D, что приводит к большим поглощениям волн КВ-диапазона. Если вспышка достаточно большая, то весь КВ-диапазон может быть непригодным для связи на некоторое время. Это более вероятно происходит при солнечном максимуме и в первой части снижения к солнечному минимуму. Увеличение затухания происходит только на пути распространения со световыми секторами (рис. 6). Затухания затрагивают только те пути, где волна проходит через область D, то есть каналы с дневными секторами. Ночные каналы не затронуты затуханиями. Затухания обычно длятся от нескольких минут иногда до двух часов, с быстрым началом и более медленным восстановлением. Продолжительность затухания зависит от интенсивности и продолжительности вспышки. Величина затухания будет зависеть от размера вспышки и положения Солнца относительно точки, где радиоволна проходит через область D. Чем выше Солнце относительно той точки, тем больше затухание. Оно самое большое в более низких частотах, которые являются первыми при воздействии на них и последними при восстановлении. На верхние частоты обычно воздействие меньше, и они могут быть годны к применению (рис. 7). Затухания затрагивают в основном низкие частоты. Высокие частоты затухают гораздо меньше и восстанавливаются быстрее.

Явления поглощения полярной шапки (ППШ). Причиной ППШ являются протоны высоких энергий, которые отрываются от Солнца, когда происходят большие вспышки, двигаются вдоль силовых линий магнитного поля к полярным областям. Там они ионизируют область D, вызывая ослабление КВ, проходящих через полярную область D. Явления ППШ наиболее вероятны в момент солнечного максимума, однако они не столь часты, как

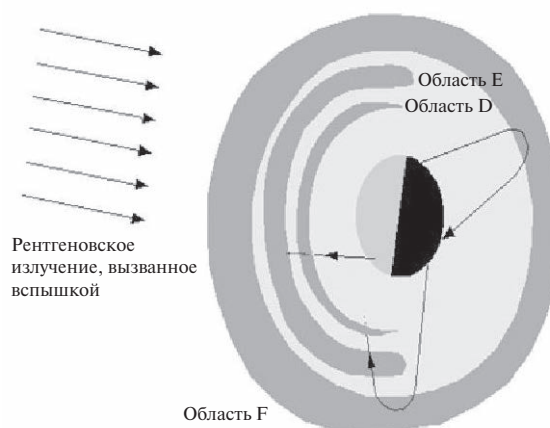


Рисунок 6. Пространственное распределение затухания

затухания. ППШ может начинаться через 10 минут после вспышки и длиться до 10 дней. Эффекты ППШ можно преодолевать, ретранслируя сообщения на каналах, которые не требуют полярных точек рефракции. Даже зимой в полярной зоне могут сказываться эффекты ППШ. Частицы от Солнца могут фактически создавать ночью область D.

Ионосферные бури (ИБ). Из-за явлений вспышек на Солнце магнитное поле Земли подвергается возмущению. Геомагнитное поле и ионосфера связаны довольно сложно, а возмущение в геомагнитном поле может часто вызывать возмущение в области F ионосферы. ИБ иногда начинаются с увеличенной электронной плотности, позволяющей использовать верхние частоты, затем сопровождаются уменьшением электронной плотности, ведущим к успешному применению только более низких частот области F. Они могут длиться в течение многих дней и воздействуют на средних и высоких широтах намного сильнее, чем на низких широтах. В отличие от омического затухания, ИБ больше всего воздействуют на верхние частоты. Чтобы уменьшить влияние этих эффектов, необходимо стремиться к использованию более низких частот. ИБ могут происходить во время всего солнечного цикла и связаны с Массовым Выбросом Короны (МВК) и щелями в короне на Солнце. На рис. 8 отображено, как ИБ повлияла на частоты станции в Австралии (средняя широта станции — от 24-й к 28-й). Верхние частоты были бы, вероятно, неприменимы в течение этого времени.

Спорадический слой Es. Спорадический (нерегулярный) слой Es может формироваться в любое время. Это происходит на высотах от 90 до 140 км (в области E), и может распространяться на большую область или быть ограничено небольшой областью. Слой Es может иметь сопоставимую электронную плотность с областью F, соответственно,

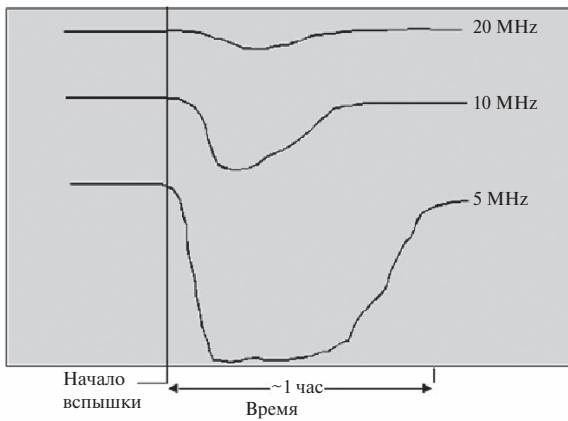


Рисунок 7. Зависимость затухания от частоты

он может преломлять сопоставимые частоты с областью F. Поэтому Es может использоваться для ВЧ-связи на больших частотах, чем позволяет нормальный слой E. Иногда Es полупрозрачен и позволяет части радиоволн проходить через него к F-области, однако в другое время Es затеняет область F полностью (рис. 9). Es в низких и высоких широтах возникает главным образом в течение дня и раннего вечера, и чаще встречается в течение летних месяцев. В высоких широтах Es имеет тенденцию формироваться ночью.

Спорадический слой Fs. Иногда область F становится диффузной, и проходящий через нее радиосигнал – это наложение множества волн, отраженных от различных высот и мест в ионосфере в немного различное время. В низких широтах Fs появляется в основном в течение ночных (вечерних) часов и в период равноденствий. В средних широтах Fs менее вероятен, чем в низких и высоких широтах. Возникновение более вероятно ночью и зимой. В широтах выше 40 градусов Fs имеет тенденцию быть ночным явлением, когда появляется в момент равноденствий, в то время как у магнитных полюсов Fs часто наблюдается и днем, и ночью.

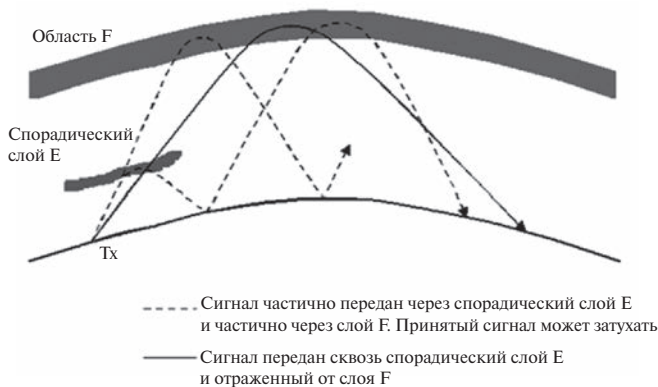


Рисунок 9. Возможные пути распространения радиоволн при наличии спорадического слоя Es

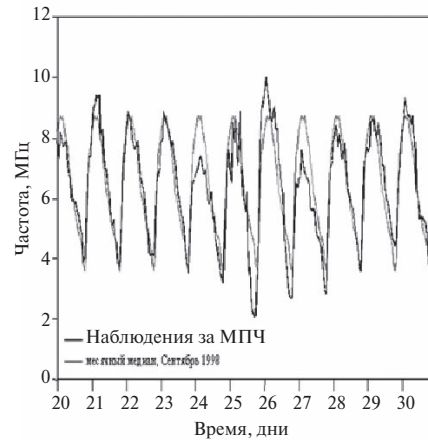


Рисунок 8. Влияние ионосферной бури на частоты станции в Австралии

Во всех широтах имеется тенденция появления Fs, когда наблюдается уменьшение в частотах области F. Появление Fs часто связывается с ИБ.

Воздействие помех радиоприему. Активные помехи имеют независимый от излучателя полезного сигнала источник КВ-радиоизлучения. Атмосферные помехи, вызванные грозами, являются обычно главной составляющей в радиопомехах в диапазоне ВЧ и особенно влияют на связь. Атмосферные помехи значительные в экваториальных областях мира и уменьшаются с увеличением широты. Их эффект наибольший на более низких частотах и, следовательно, в периоды солнечного минимума и ночью, когда используются более низкие частоты. Космический шум является результатом воздействия космических тел в пределах нашей галактики. Приемные антенны с высокими угловыми лепестками более часто подвержены этому типу шума. Промышленные помехи исходят от систем зажигания, неоновых вывесок, электрических кабелей, линий передачи энергии и сварочных машин. Промышленные помехи имеют тенденцию быть вертикально поляризованными, поэтому выбор горизонтально поляризованной приемной антенны может содействовать уменьшению этого вида шума. Помехи от других пользователей на той же самой частоте возникают из-за большого количества работающих станций. В основном это относится к радилюбительским диапазонам. Общее число любительских станций в мире скоро достигнет несколько миллионов, которым выделены 9 относительно узких участков – поддиапазонов: 160-метровый (1,81–2 МГц), 80-метровый (3,5–3,8 МГц), 40-метровый (7–7,1 МГц), 30-метровый (только телеграф 10,1–10,15 МГц), 20-метровый (14–14,35 МГц), 16-метровый (18,068–18,318 МГц), 15-метровый (21–21,45 МГц), 12-метровый (24,89–25,14 МГц), 10-метровый (28–29,7 МГц) [9]. В разных странах количество поддиапазонов и полосы частот несколько отличаются.

Пассивные помехи связаны с воздействием пространственно неоднородной, магнитоактивной, диспергирующей, поглощающей, изменчивой во времени ионосферы на структуру излученного полезного сигнала. Они проявляются как дополнительные отражения от различных неоднородностей, разнесенных по пространству: магнитоионное расщепление в ионосфере линейно поляризованного сигнала на два сигнала

с вращательной поляризацией, распространяющихся с разной скоростью, дисперсионное уширение сигнала, разное поглощение различных составляющих сигнала. Все перечисленные эффекты зависят от длины, места и ориентации радиотрассы, степени изменчивости во времени структуры ионосферы, определяемой текущей солнечной активностью с некоторым запаздыванием и возбуждением в ионосфере сложных переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акиншин Р.Н., Бирюков А.А., Сушков А.В. Передача и защита информации в каналах связи распределенных информационных систем. Тула: ТулГУ, 2007. 270 с.
2. Иванов В.А., Шумаев В.В., Колчев А.А., Батухтин В.И. Адаптация АХЧ- и ФЧХ- КВ-радиоканала к дисперсному расогласованию СРС в ионосфере // Проблемы радиосвязи: сб. трудов X Научно-технической конференции. Н. Новгород, 1999. С. 133–136.
3. Ван Трис Г.Л. Теория обнаружения, оценок и модуляций. М.: Советское радио, 1972.
4. Поликарпова А.С. Некоторые аспекты развития коротковолновой связи за рубежом. М.: ЦООНТИ «Экос», 1987.
5. Коротун В.М. Повышение точности измерения координатной информации на основе измерения плотности электронной концентрации методом некогерентного рассеяния // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Тверь: 2-й ЦНИИ МО РФ, 2006. С. 47–48.
6. Погода Э.В. Ионосферный диагностический комплекс «Базис» и его модификация // Экспериментальные методы зондирования ионосферы. М., 1981. С. 145–152.
7. Chen J., Cargill P.J., and Palmadesso P. Predicting Geoeffective Solar Wind Structures. *J. Geophys. Res.*, 102, 14701–14720, 1997.
8. Коротун В.М. Алгоритм синтеза структуры пассивной помехи // Вестник Тульского артиллерийского инженерного института. 2010. С. 28–30.

REFERENCES

1. Akinshin R.N., Biryukov A.A., Sushkov A.V. *Peredacha i zashchita informatsii v kana-lakh svyazi raspredelennykh informatsionnykh sistem* [Transmission and protection of information in communication channels of distributed information systems]. Tula, TulGu Publ., 2007, 270 p. (In Russian).
2. Ivanov V.A., Shumaev V.V., Kolchev A.A., Batukhtin V.I. Adaptation of FRC (frequency-response characteristics) – PSFC (phase-shift-frequency curve) of SW band radio channel to disperse mismatch of complex radio signals in ionosphere. *Problemy radiosvyazi: sbornik trudov X nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 1999, pp. 133–136. (In Russian).
3. Van Tris G.L. *Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsiy* [Theory of detection, evaluations and modulations]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. (In Russian).
4. Polikarpova A.S. *Nekotorye aspekty razvitiya korotkovolnovoy svyazi za rubezhom* [Some particular aspects of development of short-wave communication technologies abroad]. Moscow, Ekos Publ., 1987. (In Russian).
5. Korotun V.M. Improving of accuracy of measurement of coordinate information based on the measurement of density of electron concentration by incoherent scattering. *Materialy 2-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2006, pp. 47–48. (In Russian).
6. Pogoda E.V. Ionosfernyy diagnosticheskiy kompleks «Bazis» i ego modifikatsiya [Basis Ionospheric diagnostic complex and its modification]. *Ekspperimentalnye metody zondirovaniya ionosfery*. Moscow, 1981, pp. 145–152. (In Russian).
7. Chen J., Cargill P.J., and Palmadesso P. Predicting Geoeffective Solar Wind Structures. *J. Geophys. Res.*, 102, 14701–14720, 1997.
8. Korotun V.M. Algorithm for synthesis of passive interference structure. *Vestnik Tul'skogo artilleriyskogo inzhenernogo instituta*, 2010, pp. 28–30. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5, тел.: 8 (499) 162-03-87.

Коротун Владимир Михайлович, к.т.н., научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5, тел.: 8 (499) 162-03-87, e-mail: vkorotun@niidar.ru.

AUTHORS

Kozlov Victor, Doctor of Technical Sciences, Professor, NPK «NIIDAR», 10/5, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87.

Korotun Vladimir, PhD, Senior Researcher, NPK «NIIDAR», 10/5, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87, e-mail: vkorotun@niidar.ru.