

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 302 (2015), 40 – 45

SOLAR FLARES AND PROPAGATION OF RADIO WAVES

I. D. Kozin, I. N. Fedulina

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: IDKozin@yandex.ru

Key words: solar flare, a radiowave, propagation, reflection, absorption, power variations.

Abstract. Experimental data on propagation of radiowaves from VLF range to VHF range during the periods of solar flares are considered and analyzed. It is shown that a resultant field of radiowave is influenced by different types of ionospheric disturbances, variation of altitudes of the reflection, nondeviative absorption and interference of different modes of propagation. In low-frequency ranges of radiowaves an increase of received signal power is observed in the most cases during solar flares, in high-frequency ranges the power of propagating radio signal decreases. It is shown also that strongly pronounced patterns of radiowave reaction on solar flares are detected in VLF range, as well as in VHF range.

УДК 523.9-1:629.78, 621.029

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

И. Д. Козин, И. Н. Федулина

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: солнечная вспышка, радиоволна, распространение, отражение, поглощение, вариации мощности.

Аннотация. Рассмотрены и проанализированы экспериментальные данные по возмущениям радиоволн от СВД до УКВ диапазонов в периоды солнечных вспышек. Показано, что на результирующее поле радиоволн оказывают различные типы ионосферных возмущений, вариации высот отражения, неотклоняющее поглощение и взаимодействие различных мод распространения. В низкочастотных диапазонах радиоволн в большинстве случаев при солнечных вспышках наблюдается возрастание мощности принимаемых сигналов, в высокочастотных диапазонах при этом распространяющийся сигнал теряет свою мощность. Показано также, что эксклюзивные, ярко выраженные формы реакции радиоволн на солнечные вспышки имеют не только радиоволны СДВ, но и УКВ диапазона.

Введение. Воздействие солнечных вспышек на условия распространения радиоволн до сих пор является явлением, интересующим научный мир. Можно отметить наиболее известные эффекты такого воздействия: это полное поглощение энергии радиоволн коротковолнового диапазона, названное эффектом Делинджера [1, 2], а также амплитудные и фазо-частотные возмущения радиосигналов СДВ диапазона [3-7]. Наблюдаемые эффекты в указанных диапазонах частот, как правило, объясняют возникновением внезапных ионосферных возмущений SID. Изменения высотного профиля электронной концентрации, связанные с рентгеновским излучением солнечной вспышки приводят к возрастанию поглощения коротких и к уменьшению высоты отражения сверхдлинных радиоволн.

Целью работы является выявление характерных особенностей реакции радиоволн различных диапазонов на солнечные вспышки и создание предпосылок для выработки прогностических характеристик в функционировании телекоммуникационных и навигационных систем.

При анализе воздействия возмущений космической погоды на распространение радиоволн различных частотных диапазонов будем исходить модели, которая включает многолучёвость и, следовательно, интерференцию, поглощение мощности средой, а также изменение длины пути распространения. Изменение мощности принимаемого радиосигнала, в первом приближении, происходит по двум параметрам L_0 и ΔL .

$$P_{\text{эксп}} = \frac{P_{\text{изл}}}{L_0 \cdot \Delta L}.$$

Здесь L_0 – поглощение за счёт изменения длины пути (поглощение в свободном пространстве), а ΔL – дополнительное поглощение за счёт изменения характеристик среды распространения. Общее поглощение энергии радиоволны будет складываться из изменений обеих составляющих L_0 и ΔL .

Коэффициент затухания мощности радиоволны – фактор L_0 – вычисляется в предположении, что распространение радиоволн происходит в свободном пространстве, то есть между передающей и приёмной антеннами не имеется атмосферы и никаких физических препятствий. Вычисление это проводится очень легко, если известны основные свойства приёмной и передающей антенн.

Поскольку при изменении высотного профиля электронной концентрации основные свойства приёмо-передающего тракта не меняются, можно записать

$$L_0 \approx \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}.$$

То есть, изменения L_0 и, следовательно, мощности принимаемого радиосигнала для выбранной частоты, будут пропорциональны изменению квадрата длины пути – d^2 .

На величину принимаемых сигналов также будет действовать местное время, приходящееся на середину трассы, географическая широта, направление трассы распространения относительно вектора магнитного поля и зенитный угол приходящей радиации. Вид ожидаемых эффектов поглощения электромагнитной энергии радиоволны, вклад каждой из составляющих L_0 и ΔL можно оценить на моделях, но окончательный и истинный результат можно получить только в экспериментальных измерениях.

Схематические представления реакции радиоволн на изменения условий распространения, связанные с возмущениями космической погоды, приведены на рисунке 1.

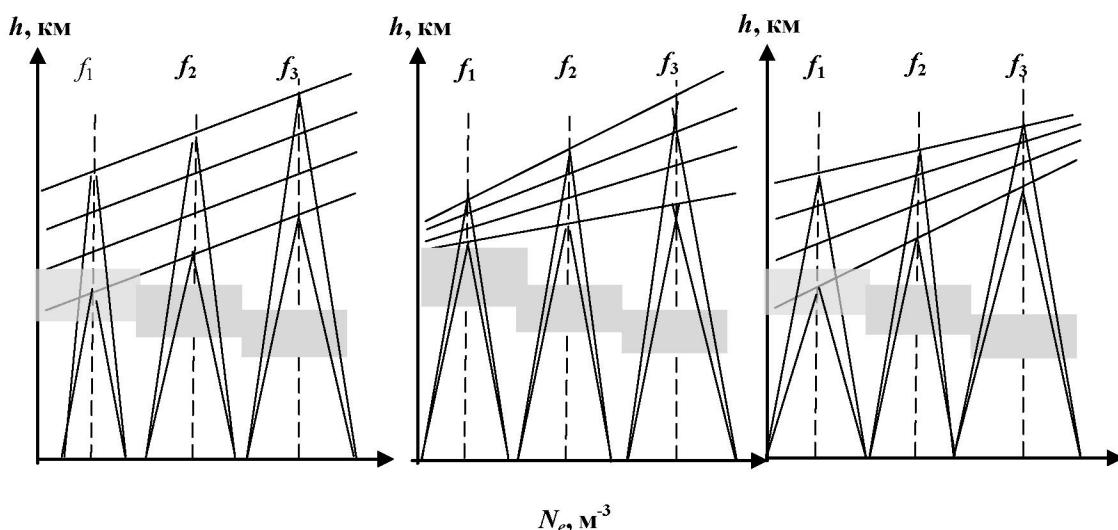


Рисунок 1 – Принципиальные схемы воздействия вариаций профиля электронной концентрации на траекторию и поглощение радиоволн различных диапазонов

Здесь представлены три условных варианта изменения высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$, м⁻³. Вертикальная штриховая линия относится к условиям середины радиотрассы. Первый вариант изменений профиля электронной концентрации имеет вид параллельного смещения по вертикали. Второй вариант имеет вид веера вверх, то есть на больших высотах изменения величины электронной концентрации зачительней, чем на более низких высотах. Третий вариант вариаций $N_e(h)$ имеет вид веера вниз, когда на меньших высотах электронная концентрация изменяется быстрее, чем на больших высотах.

Показаны опять-таки условно, траектории распространения радиоволн с частотами $f_1 < f_2 < f_3$. Полагается, что для определённых частот радиоволны необходима столь же определённая и неизменная на разных высотах электронная концентрация N_e .

В работе [8] показаны условия отражения радиоволны в ионосфере. Отражение радиоволны происходит в точке, в которой плазменная частота ионосферы ω_0 равна круговой частоте радиоволны ω . В свою очередь плазменная частота определяется величиной электронной концентрации

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 \cdot N_e}{m}} = \sqrt{3,18 \cdot 10^9 \cdot N_e},$$

где e и m – заряд и масса электрона.

Как видно, чем выше излучаемая частота ω , тем большая электронная концентрация N_e требуется ее отражения. При изменениях высотного профиля электронной концентрации меняется и высота отражения.

Для оценки вклада ионосферной части поглощения ΔL введем в вертикальный профиль области неотклоняющего поглощения амплитуды напряжённости поля радиоволны. Эта область, также условно, обозначена на рисунке 1 серым цветом.

Известно, что величина неотклоняющего поглощения энергии радиоволн пропорциональна

$$E = E_0 \exp \left\{ - \int_s^{s_1} \alpha ds \right\}.$$

Необходимо принять во внимание характер изменения эффективной частоты соударений в зависимости от тепловой скорости электронов.

При расчетах характеристик радиосигналов, распространяющихся в ионосфере, необходимы вычисления не только электронной концентрации, но и эффективной частоты соударений электронов с нейтральными молекулами атмосферного газа. Величина частоты соударений рассчитывается по формуле П. Бэнкса [9], которая имеет вид:

$$\nu(h) = 2.33 \cdot 10^{-11} \cdot N_2(h) [1 - 1.24 \cdot 10^{-4} \cdot T(h)] \cdot T(h) + \\ + 1.82 \cdot 10^{-10} O_2(h) [1 + 3.6 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{T(h)}] \cdot \sqrt{T(h)},$$

где N_2 и O_2 – концентрации молекул азота и кислорода; h – высота атмосферы; T – температура.

Таким образом, для волны данной частоты показатель поглощения увеличивается с высотой в более низких областях, достигает максимума, а затем уменьшается с высотой. Следовательно, имеются значения $\nu = \nu'$, для которых показатель α является максимальным, как это показано на

рисунке 2. Это значение получается путем дифференцирования выражения $\frac{\nu}{\nu^2 + \alpha^2}$ по ν и приравнивания его производной нулю.

При этом получим, что показатель поглощения α максимальен на уровне, на котором частота соударений равна круговой частоте волны. Отсюда, чем выше частота волны f , тем ниже уровень h максимума показателя поглощения.

Для выделения периодов солнечных вспышек рассмотрим вариации рентгеновского излучения, которые изображены на рисунке 3.

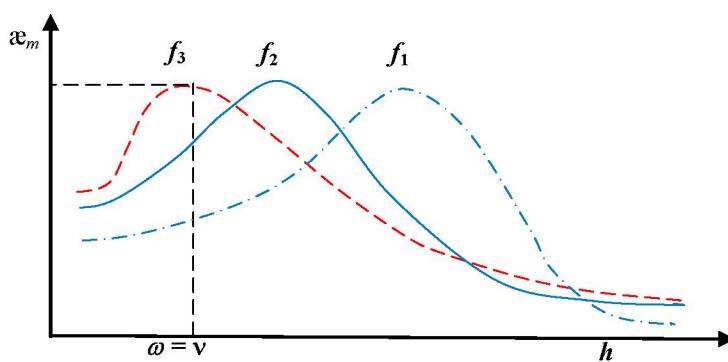


Рисунок 2 – Изменение показателя неотклоняющего поглощения (α_m – предельное значение α) в зависимости от высоты h для различных частот

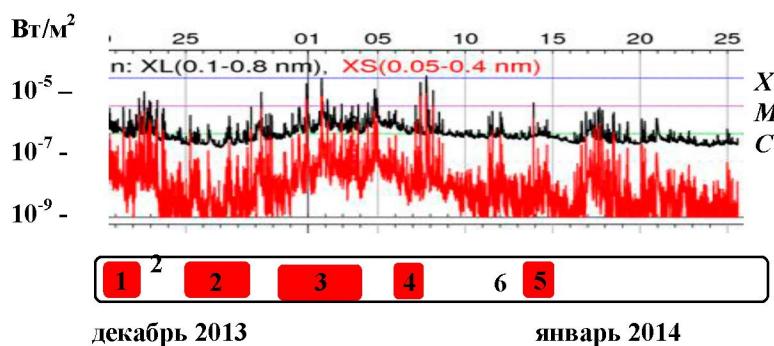


Рисунок 3 – Вариации потока энергии рентгеновского излучения в диапазонах:
а) 0,1–0,8 нм и б) 0,05–0,4 нм для периода 21 декабря 2013 г. – 26 января 2014 г. [10]

На рисунке 3 выделены три уровня плотности потока X, M и C. Вариации рентгеновского излучения Солнца приведены по данным GOES Space Environment Monitor (GOES - Geostationary Operational Environmental Satellites) [10]. Внизу рисунка отмечены временные интервалы, в которых плотность потока энергии излучения в обоих диапазонах превышала уровень M. Таких периодов отмечено 5.

Для исследований вариаций мощности радиоволн, регистрируемых в г. Алматы, рассмотрим временной интервал 21 декабря 2013 года – 26 января 2014 года. Для мониторинга поведения радиоволн в выбранный период использовался многоканальный анализатор радиоспектра «БАРС». В качестве модулей измерителей спектра в устройстве используются изделия SA44B (1Гц-4,4 ГГц). В пяти каналах анализатора «БАРС» проводились измерения мощности сигналов в дБм относительно 1Вт в широком СДВ - УКВ диапазоне частот.

На рисунке 4а приведены вариации сигнала 16 кГц, излучаемого станцией Регби (Великобритания). В рассматриваемый период наблюдалось два мощных всплеска мощности принимаемого сигнала, по времени совпадавшие с периодами вспышек рентгеновского излучения на Солнце, обозначенных на рисунке 3 цифрами 2 и 5.

Повышение мощности принимаемых сигналов составило 17 и 8 дБм соответственно. Такое поведение СДВ сигналов хорошо известно и объясняется внезапными ионосферными возмущениями SID. События 3 и 4 совпали с возмущениями иной природы и чётко не проявились.

Представляет интерес поведение радиосигналов в других диапазонах частот. На рисунке 4б представлены вариации ДВ сигналов на частоте 280 кГц и на рисунке 4в – 2 МГц.

На этих записях хорошо просматриваются суточный ход и множество как положительных, так и отрицательных возмущений мощности сигнала. Большое число кратковременных возмущений

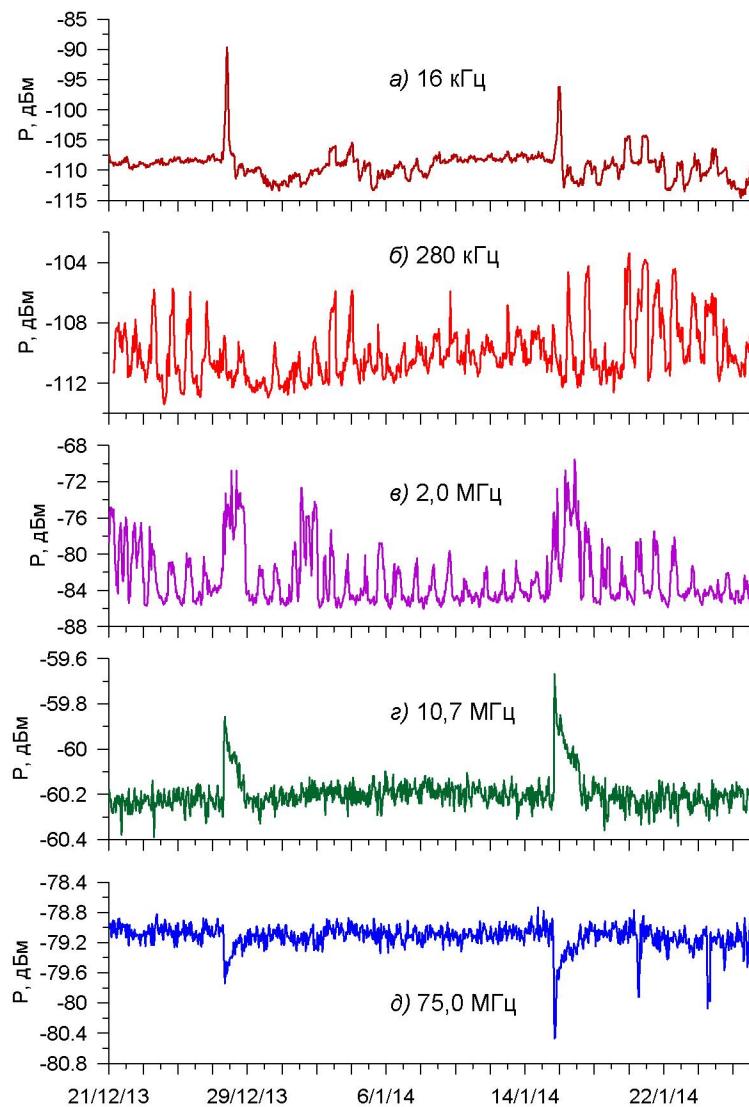


Рисунок 4 – Вариации мощности радиосигналов на частотах от 16 кГц до 75,0 МГц

можно объяснить воздействием всплесков маломощных рентгеновских вспышек. Их проникновение на более низкие высоты ионосферы затруднительно. И хотя часть этих возмущений совпадает по времени с всплесками рентгеновского излучения на Солнце делать конкретные выводы преждевременно.

На следующем рисунке 4 ε и 4 δ представляем изменения мощности радиосигнала на частотах 10,7 и 75,0 МГц. На обеих частотах демонстрируется отсутствие суточного хода. Для частоты 10,7 МГц это может быть объяснено превышением максимально применимых частот для этого сезона и близким расположением к приёмному пункту. Удивительно, но всплески потока рентгеновского излучения под номерами 3 и 4, приведенными на рисунке 3, нашли отклик, хотя и с разным знаком, на исследуемых частотах. Отсюда вытекает, что наземный способ фиксации мощных рентгеновских вспышек можно производить не только в СДВ, но и в УКВ диапазонах.

Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Исследование воздействия космической погоды на распространение радиоволны» (Грант 0038/ГФ1, Регистрационный номер (РН) 0112РК02388).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Goodman J.M. Space Weather & Telecommunications. Springer Science+Business Media - 2005. - 382 p.
- [2] ITU-R HDBK IIE: The Ionosphere and its Effects on Radiowave Propagation. A Guide with Background to ITU-R Procedures for Radio Planners and Users. Geneva: Radiocommunication Bureau, ITU. - 1998.

- [3] Каипар Ю.В., Козин И.Д., Никитин А.А. О возможностях различных методов контроля и диагностики внезапных ионосферных возмущений // Низкочастотный волновод «Земля-ионосфера»: сб. науч. ст. Алматы: Наука Каз ССР. - 1991. - С. 21-23.
- [4] Каипар Ю.В., Козин И.Д., Никитин А.А. О связи поглощения КВ и фазовой аномалии СДВ при солнечных вспышках // Динамика ионосферы: сб. науч. ст. Алматы: ФЫРЫМ. - 1991. - т. 2. - С. 34-36.
- [5] De Canck M.H. Radiowave propagation. vol. 6. Antenne X Online Magazine. – 2009. – 410 p.
- [6] Conreira D.B., Rodrigues F.S., Makita K., Brum C.G.M., Gonzalez W., Trivedi N.B., da Silva M.R., Schuch N.J. An experiment to study solar flare effects on radio-communication signals // Advances in Space Research. – 2005. – Vol. 36. – P. 2455–2459.
- [7] Davies K. Ionospheric Radio waves. London: Peter Peregrinus Ltd. – 1990. - 506 p.
- [8] Козин И.Д., Федуллина И.Н. Распространение радиоволн: Учебное пособие. Алматы: АУЭС. – 2014. - 80 с.
- [9] Banks P.M. Collision frequencies and energy transfer Planet // Space Sci. – 1966. -Vol 14. - P. 1085-1122.
- [10] National Geophysical Data Center: Solar - Terrestrial Physics Division. Direct Access to GOES Space Environment Monitor Data & Plots [Электронный ресурс]. URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/> (дата обращения: 18.05.2014).

REFERENCES

- [1] Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications*. Springer Science+Business Media, 2005. 382 p. (in Eng.).
- [2] ITU-R HDBK II: *The Ionosphere and its Effects on Radiowave Propagation*. A Guide with Background to ITU-R Procedures for Radio Planners and Users. Geneva: Radiocommunication Bureau, ITU, 1998 (in Eng.).
- [3] Kashpar Ju.V., Kozin I.D., Nikitin A.A. *Nizkochastotnyj volnovod «Zemlja-ionosfera»*: sb. nauch. st. Almaty: Nauka Kaz SSR, 1991, 21-23 (in Russ.).
- [4] Kashpar Ju.V., Kozin I.D., Nikitin A.A. *Dinamika ionosfery*: sb. nauch. st. Almaty: Gylym, 1991, 2, 34-36 (in Russ.).
- [5] De Canck M.H. *Radiowave propagation*. vol. 6. Antenne X Online Magazine, 2009, 410 p. (in Eng.).
- [6] Conreira D.B., Rodrigues F.S., Makita K., Brum C.G.M., Gonzalez W., Trivedi N.B., da Silva M.R., Schuch N.J. An experiment to study solar flare effects on radio-communication signals. *Advances in Space Research*, 2005, 36, 2455–2459. (in Eng.).
- [7] Davies K. *Ionospheric Radio waves*. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990, 506 p. (in Eng.).
- [8] Kozin I.D., Fedulina I.N. *Propagation of Radiowaves*: Almaty: AUPET, 2014, 80 p. (in Russ.).
- [9] Banks P.M. Collision frequencies and energy transfer Planet. *Space Sci*, 1966, 14, 1085-1122. (in Eng.).
- [10] National Geophysical Data Center: Solar - Terrestrial Physics Division. Direct Access to GOES Space Environment Monitor Data & Plots. URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/> (in Eng.).

КҮН ЖАРҚЫЛДАРЫ ЖӘНЕ РАДИОТОЛҚЫНЫҢ ТАРАЛУЫ

И. Д. Козин, И. Н. Федуллина

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: күн жарқылдары, радиотолқын, таралу, шағылысы, жұту, қуаттың вариациясы.

Аннотация. Күн жарқылдары кезінде төменгіжайлікті толқындардан ультрақысқа толқындарға дейінгі радиотолқындардың ауытқулары бойынша тәжірибелік мәліметтер карастырылған және анализ жасалған. Радиотолқындардың қорытқы ерісіне ионосфералық ауытқулары, шағылысының өсуінін вариациясы, ауып кетпейтін жұтылу және әртурлі таралу модаларының әсері көрсетілген. Төменгіжайлікті диапазондардағы радиотолқындар көп жағдайда күн жарқылдарында өзінің қуаттың жоғалтатын, бірақ дабылды тарататын жоғарғыжиштік диапазондардағы дабылдарды қабылдайтын қуаттың өсуі бакыланады. Сонымен қатар күн жарқылдарында радиотолқындардың эксклюзивті, анық көрсетілген реакциясының түрлерінде тек қана төменгіжайлікті толқындары ғана емес, және де ультрақысқа толқындар диапазоны да болатыны зерттелген.

Поступила 07.07.2015 г.