

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-8-16

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ

УДК 551.594.6 + 621.391.821

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДВ
РАДИОВОЛН В ВОЛНОВОДЕ
«ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА» НА ТРАССАХ
«НОВОСИБИРСК – УЛАН-УДЭ» И
«КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ – УЛАН-УДЭ» ВО
ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СОЛНЕЧНЫХ
ВСПЫШЕК 31 АВГУСТА-12 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА ***

**Ю. Б. Башкуев, В. Р. Адвокатов, Д. Г. Буянова,
М. Г. Пушкарев, М. Г. Дембелов**

Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой 6

E-mail: buddich@mail.ru

Проведен анализ амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ поля СДВ РНС РСДН-20 во время сильных магнитных бурь и солнечных вспышек 1-12 сентября 2017 года. Исследованы трассы широтного простираия: 1 «Новосибирск – Улан-Удэ», длина - 1580 км; 2 «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ», длина – 2080 км. Рассмотрены суточные вариации медианной амплитуды радиосигналов 11.9 и 14.88 кГц на трассах 1 и 2, полученные после децимации и пропускания массива измерений через цифровой сглаживающий полиномиальный фильтр Савицкого-Голея. Представлены расчеты поля в волноводе «Земля-ионосфера». Анализ условий распространения радиоволн во время магнитных бурь и солнечных вспышек выявил существенные различия в пространственных амплитудно-фазовых явлениях в обычных и аномальных геомагнитных условиях на частотах 11.9 и 14.88 кГц при распространении на пространственно-разнесенных трассах широтного простираия. Основным фактором, оказывающим влияние на параметры СДВ сигнала в волноводе «Земля-ионосфера» во время гелиогеофизических возмущений, является увеличение концентрации электронов в D слое ионосферы и связанное с этим изменение геометрии волновода.

Ключевые слова: магнитные бури, волновод, ионосфера, солнечные вспышки

© Башкуев Ю. А. Б. и др., 2018

*Статья подготовлена по госбюджетному проекту 336-2016-0002 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» и частично поддержан грантом РФФИ № 18-47-030006 р_а.

Введение

Результаты исследований распространения сверхдлинных волн (СДВ) – радиоволн с длиной волны выше 10 км, свидетельствуют о существенном изменении амплитудно-фазовых характеристик сигналов во время рентгеновских солнечных вспышек и магнитных бурь. В работах [1]-[3] анализируются изменения параметров D области во время вспышки X класса 6 сентября 2017 года. Основным фактором, оказывающим влияние на параметры СДВ сигнала в волноводе «Земля-ионосфера», является увеличение концентрации электронов в нижних слоях ионосферы и связанное с этим изменение геометрии волновода. Результаты исследований показывают, что при мощных гелиогеофизических возмущениях, в том числе рентгеновских вспышках, ионизация D области может существенно возрастать, достигая значений 10^5 - 10^6 см⁻³. Цель статьи – провести анализ условий распространения СДВ радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера» на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ» во время магнитных бурь и солнечных вспышек 1-12 сентября 2017 года.

Эксперимент

Цифровой измерительный комплекс имеет опорный стандарт частоты на основе GPS приемника Trimble Thunderbolt-B с суточной нестабильностью частоты 10^{-12} . Проведем анализ результатов измерений амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ электромагнитного поля СДВ импульсно-фазовой РНС РСДН-20 на двух радиотрассах широтного простирания: трасса 1 «Новосибирск – Улан-Удэ», длина - 1580 км; трасса 2 «Комсомольск-на-Амуре - Улан-Удэ», длина – 2080 км. По данным лаборатории рентгеновской астрономии Солнца ФИАН [4] магнитные бури с $K_p = 4$ -5 произошли 2, 5, 8-9 сентября 2017, особенно сильные многочасовые магнитные бури отмечены 8-9 сентября с K_p -индексом от 5 до 8 баллов. 4-11 сентября (спутник GOES-15) на Солнце произошло множество вспышек класса M (4-5, 7-9 сентября) и сильных вспышек класса X (6 и 10 сентября). На рис.1 представлен индекс вспышечной активности Солнца 1-12 сентября 2017 г.

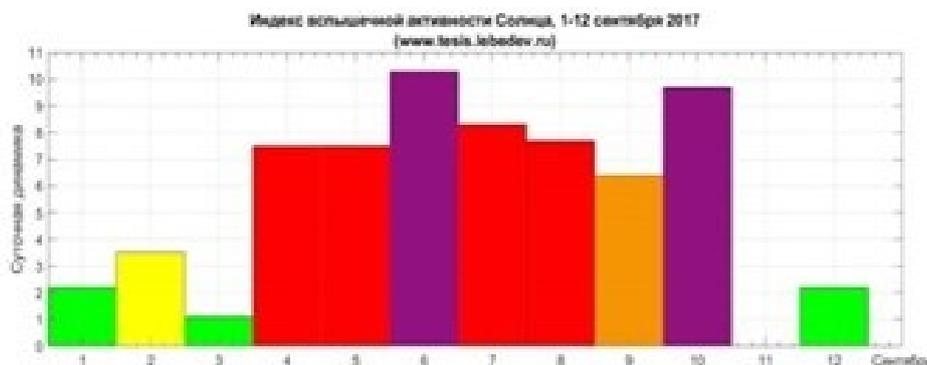


Рис. 1. Индекс вспышечной активности Солнца 1-12 сентября 2017 г.

На рис. 2 и 3 приведены суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ радиосигналов 11.9 и 14.88 кГц с 31 августа по 12 сентября 2017 г. на трассах 1 и 2.

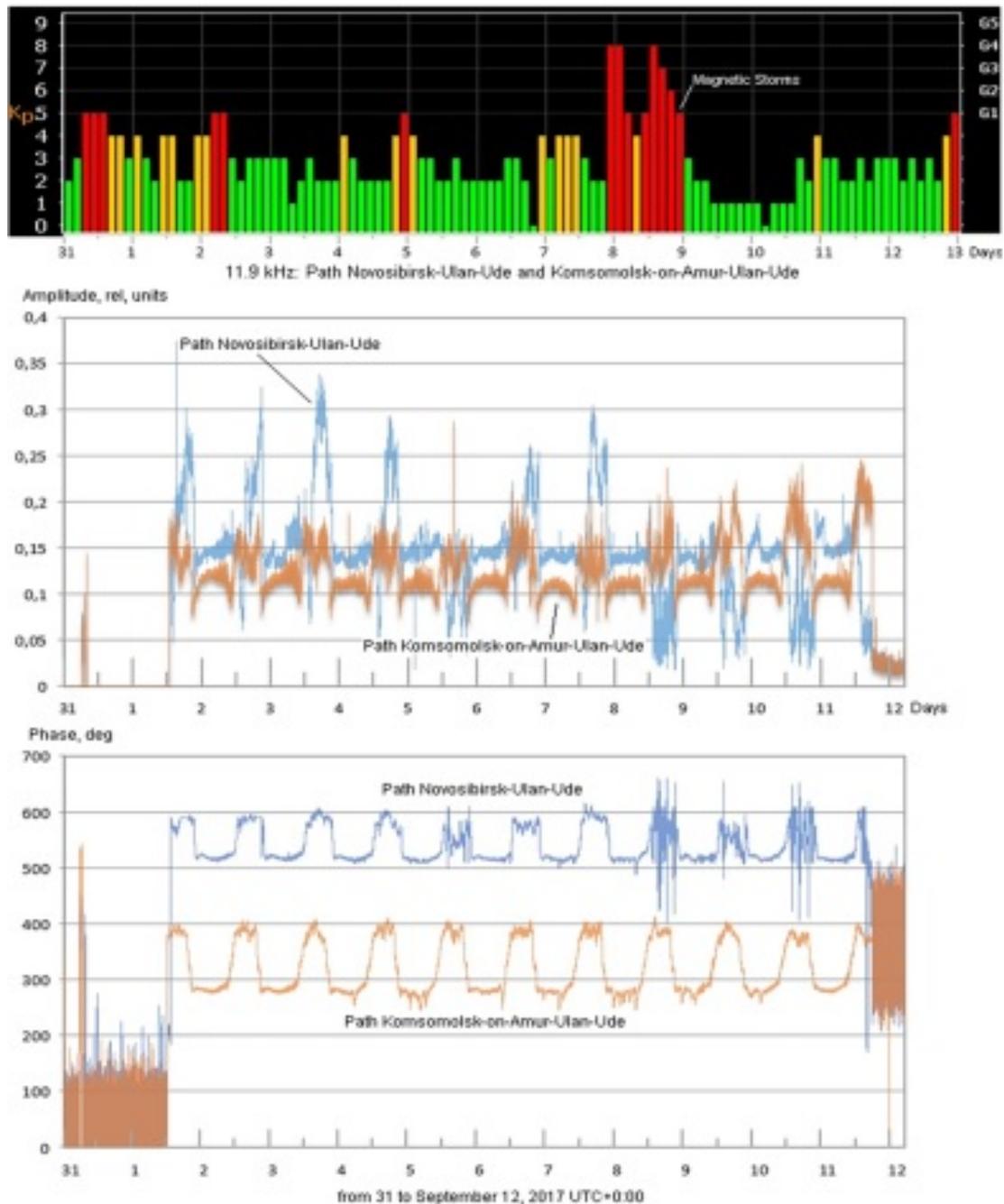


Рис. 2. Суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ радиосигналов РСДН-20 на трассах «Новосибирск-Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ» на частоте 11.9 кГц. На верхней панели представлена геомагнитная обстановка на период с 31 августа по 12 сентября 2017 года. Красным цветом выделены магнитные бури

На верхней панели рис. 2 показана геомагнитная обстановка на Земном шаре (K_p -индекс). Там же показаны суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ сигнала на частоте 11.9 кГц на трассах 1 и 2, когда в средних широтах день примерно на 1-1.5 часа длиннее ночи. Восточная трасса 2 длиннее западной трассы 1 на 500 км, поэтому уровень сигнала почти всегда закономерно ниже. В обычных геомагнитных условиях четко разделяются дневные и ночные уровни амплитуды

и фазы радиосигнала. Дневной уровень амплитуды сигнала в первой половине сентября на трассе 2 стабильный, в среднем от 0.1 до 0.13 относительных единиц (далее о.е.). В ночное время сигнал в среднем в 1.5-2 раза выше и изменяется от 0.15 до 0.24 о.е. Отчетливо видно смещение линий терминаторов на восточной и западной трассах примерно на 1-2 часа. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ имеет также закономерные регулярные суточные вариации в пределах до 120° . Существенные различия на трассах 1 и 2 наблюдаются в уровне амплитуды сигнала во время магнитных бурь. 5, 8, 9 и 10 сентября на трассе 1 ночные уровни существенно ниже дневных, происходит уменьшение амплитуды до 6 раз. Это явление отмечено впервые за период наблюдений с 2013 года. Фаза сигнала ведет себя также аномально, часто наблюдается «дребезг» и даже срыв фазы. Уровни принимаемого сигнала в дневное время закономерно и плавно изменяются с максимумом в полуденное время, в ночное время суток амплитуда в целом выше, чем днем, но она подвержена быстрым и глубоким флуктуациям.

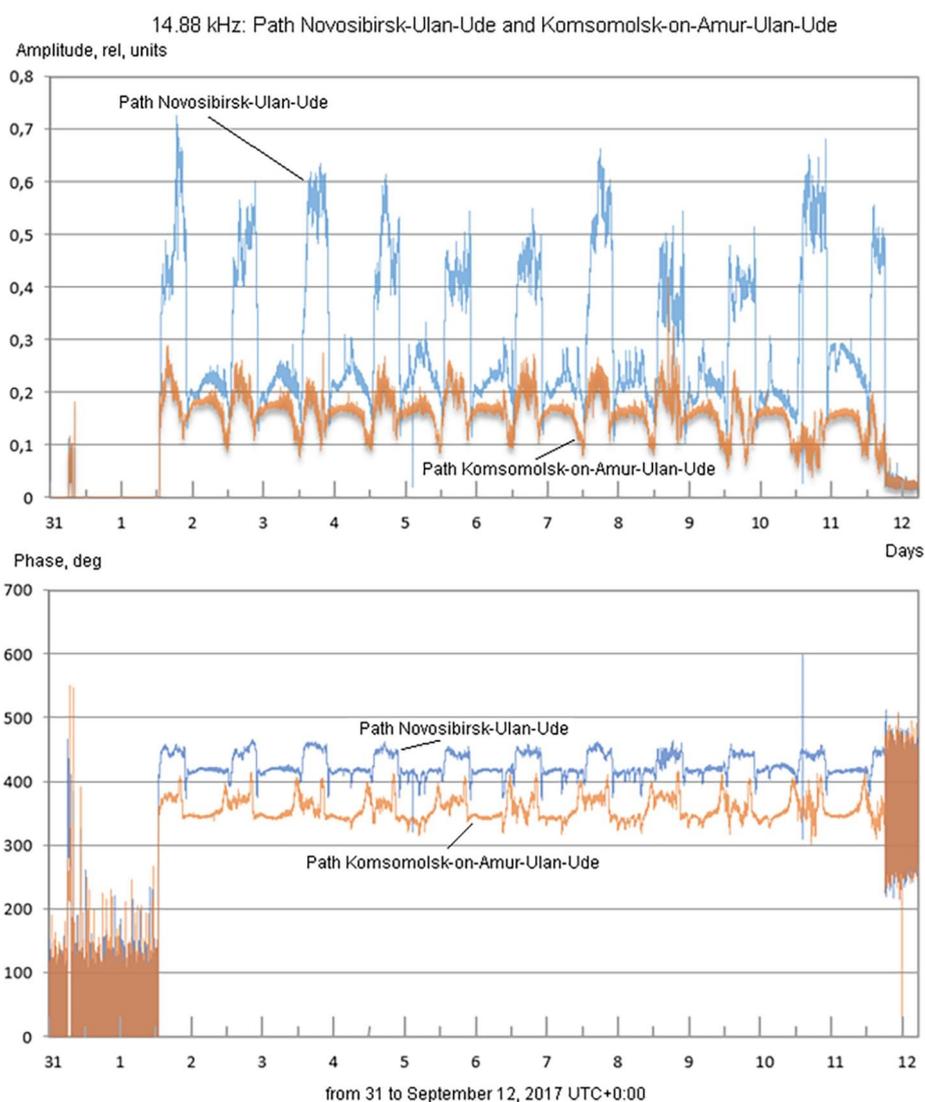


Рис. 3. Суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ радиосигналов РСДН-20 на трассах «Новосибирск-Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ» на частоте 14.88 кГц

На рис. 3 представлены суточные вариации амплитуды и дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ сигнала на частоте 14.88 кГц на тех же трассах. Уровни принимаемого сигнала в дневное время также закономерно и плавно изменяются с максимумом в полуденное время, в ночное время суток амплитуда в 2-2.5 раза выше, чем днем, она подвержена быстрым и глубоким флуктуациям, как и на частоте 11.9 кГц. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ днем плавно уменьшается от 150° до 100° , а ночью увеличивается до $300^\circ - 340^\circ$. При сильных ночных вариациях амплитуды сигнала (от 0.3 до 0.71 о.е.) дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ существенно не изменяется. На трассе 2 в эти же дни амплитуда сигнала существенно не уменьшилась, а даже возросла 9, 10 и 11 сентября. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ сохранила свой регулярный суточный ход – максимумы до 400° – ночью и минимумы в $270^\circ-280^\circ$ – днем. Следовательно, наблюдаются существенные различия в пространственных амплитудно-фазовых явлениях в обычных и аномальных геомагнитных условиях и во время рентгеновских солнечных вспышек на частотах 11.9 и 14.88 кГц при распространении СДВ радиоволн на пространственно-разнесенных трассах широтного простираения. Они заключаются в существенном уменьшении уровня сигнала на частоте 11.9 кГц во время очень сильной магнитной бури. На частоте 14.88 кГц также отмечены сходные явления, но они выражены менее заметно. Так, амплитуда сигнала в ночное время уменьшилась не очень заметно на трассе 1 ночью 5-6 и 8-9 сентября. На трассе 2 уровень сигнала в целом всегда ниже, чем на трассе 1. При этом понижения уровня ночью отчетливо выражены только 9 и 10 сентября. Дополнительная фаза $\varphi_{\text{доп}}$ имеет на трассе 1 закономерные регулярные суточные вариации в пределах от 420° до 460° . Уверенно разделяются дневные и ночные средние уровни фазы $\varphi_{\text{доп}}$. Для дневных условий $\varphi_{\text{доп}} = 420^\circ$, для ночных условий $\varphi_{\text{доп}} = 460^\circ$. На графиках $\varphi_{\text{доп}}$ (рис.3) при заходе и восходе Солнца видны области кратковременной потери фазовой однозначности («потеря фазы»), связанные, вероятно, с резкими изменениями уровня поля при прохождении линии терминатора, а также из-за воздействия хаотических импульсных помех естественного или техногенного происхождения. На трассе 2 суточный ход фазы выражен менее устойчивым ходом с частой потерей его регулярности.

Обсуждение результатов

Более детально изменение амплитуды сигналов на трассах 1 и 2 прослежены на рис. 4. На этом рисунке суточные вариации медианной амплитуды радиосигналов РСДН-20 на трассах 1 и 2 на частотах 11.9 и 14.88 кГц получены после децимации (прореживания) и пропускания массива измерений через цифровой сглаживающий полиномиальный фильтр Савицкого-Голея (программа MATLAB). Этот фильтр является оптимальным в том смысле, что он минимизирует ошибки по методу наименьших квадратов аппроксимацией «зашумленных» данных полиномиальными окнами. Фильтр Савицкого-Голея работает намного лучше, чем стандартные КИХ-фильтры, которые имеют тенденцию отфильтровывать значительную часть высокочастотного «зашумленного» сигнала.

На рис.4 отчетливо видно аномально сильное уменьшение амплитуды сигнала на частоте 11.9 кГц ночью 5, 8, 9, 10 и даже 11 сентября. При этом отмечен рост амплитуды сигнала 9, 10 и 11 сентября на трассе 2. На частоте 14.88 кГц (рис. 4) также отмечены сходные явления в уровне сигнала, но они выражены менее заметно.

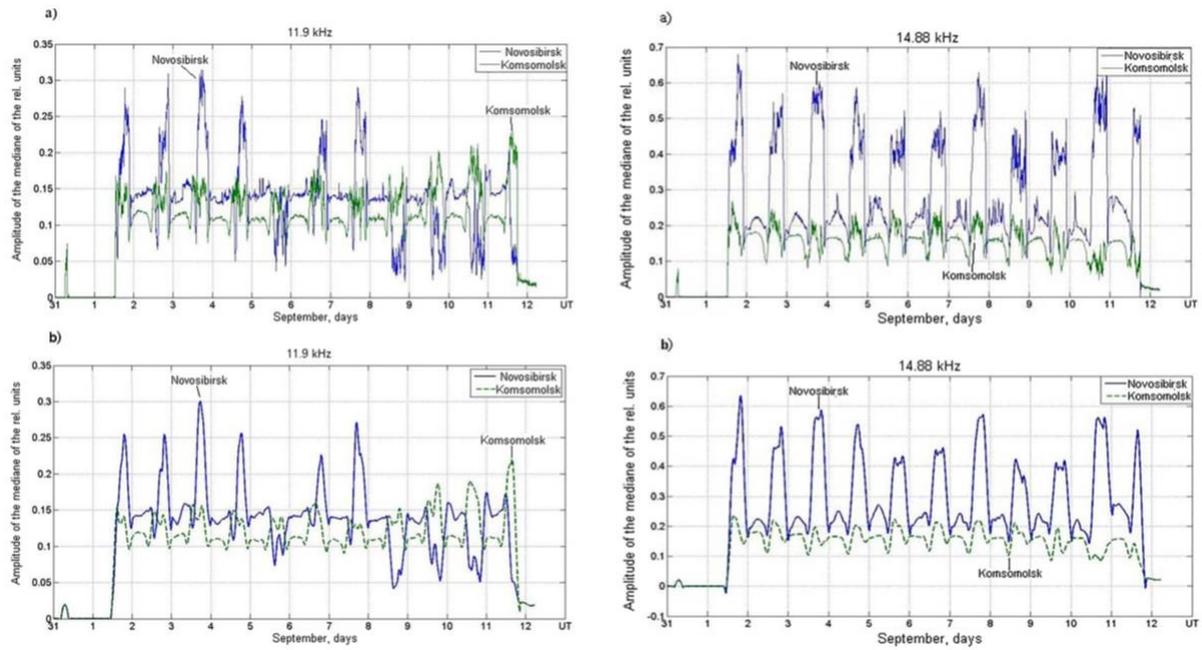


Рис. 4. Суточные вариации медианной амплитуды радиосигналов РСДН-20 на трассах «Новосибирск-Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре-Улан-Удэ» на частотах 11.9 и 14.88 кГц

На этой частоте отчетливо видно уменьшение амплитуды сигнала в ночное время на трассе 1 5 – 6 и 8 - 9 сентября. На трассе 2 уровень сигнала в целом всегда ниже, чем на трассе 1. При этом понижения уровня ночью отчетливо выражены только 10 и 11 сентября.

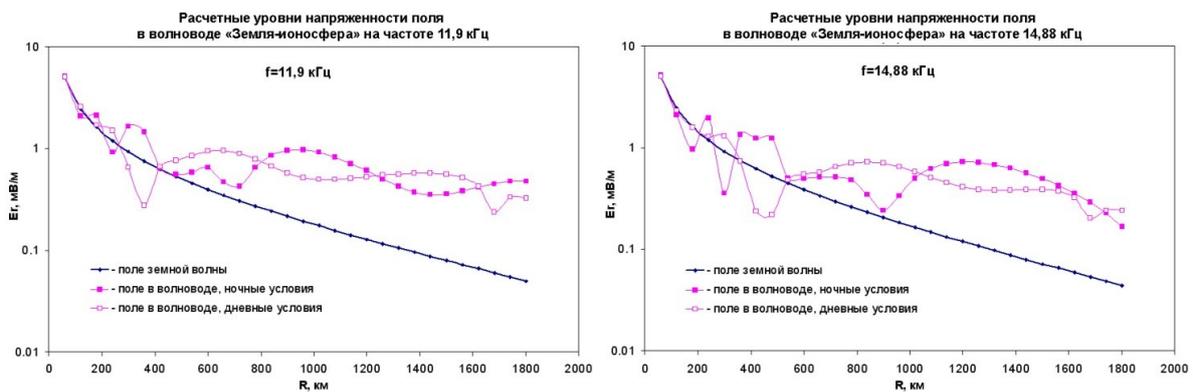


Рис. 5. Расчетные уровни напряженности поля в волноводе «Земля-ионосфера» на частотах 11.9 и 14.88 кГц

На рис. 5 представлены результаты расчетов напряженности поля в волноводе «Земля-ионосфера» на частотах 11.9 и 14.88 кГц для излучаемой мощности 1 кВт. Для дневных условий высота волновода принята равной 72.5 км, для ночи – 85 км. В расчетах учтены две моды. Для сравнения приведено поле земной волны для однородной модели с проводимостью 10^{-2} См/м и относительной диэлектрической проницаемостью, равной 10.

Заключение

1. Магнитные бури и потоки ультрафиолетового и рентгеновского излучения от солнечных вспышек, направленные в сторону Земли, существенно меняют свойства ионосферы и характеристики канала распространения СДВ радиоволн, нарушая закономерные регулярные суточные амплитудно-фазовые характеристики. Основным фактором, оказывающим влияние на параметры СДВ сигнала в волноводе «Земля-ионосфера» во время гелиогеофизических возмущений, является увеличение концентрации электронов в D слое ионосферы и связанное с этим изменение геометрии волновода. Результаты исследований показывают, что при мощных рентгеновских вспышках, ионизация D области может существенно возрасти, достигая значений 10^5 - 10^6 см⁻³.

2. Во время магнитных бурь и солнечных вспышек в сентябре 2017 года установлены существенные различия в пространственных амплитудно-фазовых явлениях в обычных и аномальных гелиогеофизических условиях на частотах 11.9 и 14.88 кГц при распространении СДВ радиоволн на пространственно-разнесенных трассах широтного простираения. Они заключаются в существенном уменьшении уровня сигнала на частоте 11.9 кГц во время очень сильной магнитной бури. На частоте 14.88 кГц также отмечены сходные явления, но они выражены менее заметно. Суточный ход дополнительной фазы $\varphi_{\text{доп}}$ на частотах 11.9 кГц и 14.88 кГц на обеих трассах также выражен ее менее устойчивым ходом в возмущенные дни и подвержен быстрым и глубоким флуктуациям в дни солнечных вспышек (5, 6, 8-10 сентября) и геомагнитных бурь.

Список литературы

- [1] Корсаков А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р., “Эффекты солнечных вспышек в сентябре 2017 года в амплитудно-фазовых вариациях сигналов ОНЧ радиостанций”, *Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*, Томск, 2018, 143–146. [Korsakov A. A., Kozlov V. I., Karimov R. R., “Эффекты солнечных вспышек в сентябре 2017 года в амплитудно-фазовых вариациях сигналов ОНЧ радиостанций”, *Sbornik докладov XXIV Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery»*, Tomsk, 2018, 143–146].
- [2] Гаврилов Б. Г., Ляхов А. Н., Поклад Ю. В., Рыбаков В. А., Ряховский И. А., Лосева Т. В., “Геофизические эффекты солнечной вспышки 6 сентября 2017 года”, *Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*, Томск, 2018, 33–36. [Gavrilov B. G., Lyahov A. N., Poklad YU. V., Rybakov V. A., Ryahovskij I. A., Loseva T. V., “Геофизические эффекты солнечной вспышки 6 сентября 2017 года”, *Sbornik докладov XXIV Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery»*, Tomsk, 2018, 33–36].
- [3] Корсунская Ю. А., Поклад Ю. В., Гаврилов Б. Г., Ряховский И. А., Лосева Т. В., Зецер Ю. И., Бисярин М. А., Кириллов В. В., Орлов А. Б., Пронин А. Е., “Численное моделирование влияния солнечных рентгеновских вспышек в сентябре 2017 года на среднеширотные СДВ трассы”, *Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»*, 2018, 139–142. [Korsunskaya Yu. A., Poklad Yu. V., Gavrilov B. G., Ryahovskij I. A., Loseva T. V., Zecer Yu. I., Bisyarin M. A., Kirillov V. V., Orlov A. B., Pronin A. E., “Численное моделирование влияния солнечных рентгеновских вспышек в сентябре 2017 года на среднеширотные СДВ трассы”, *Sbornik докладov XXIV Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery»*, 2018, 139–142].
- [4] <http://tesis.lebedev.ru/> (дата обращения 23 апреля 2018 г.).

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Корсаков А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. Эффекты солнечных вспышек в сентябре 2017 года в амплитудно-фазовых вариациях сигналов ОНЧ радиостанций // Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». г. Томск. 2018. С. 143–146.
- [2] Гаврилов Б. Г., Ляхов А. Н., Поклад Ю. В., Рыбаков В. А., Ряховский И. А., Лосева Т. В. Геофизические эффекты солнечной вспышки 6 сентября 2017 года // Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». г. Томск. 2018. С. 33–36.
- [3] Корсунская Ю. А., Поклад Ю. В., Гаврилов Б. Г., Ряховский И. А., Лосева Т. В., Зецер Ю. И., Билярин М. А., Кириллов В. В., Орлов А. Б., Пронин А. Е. Численное моделирование влияния солнечных рентгеновских вспышек в сентябре 2017 года на среднеширотные СДВ трассы // Сборник докладов XXIV Международного Симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 2018. С. 139–142.
- [4] <http://tesis.lebedev.ru/>(дата обращения 23 апреля 2018 г.).

Для цитирования: Башкуев Ю. А.Б., Адвокатов В. А.Р., Буянова Д. А.Г., Пушкарев М. А.Г. Дембелов М. Г. Анализ условий распространения СДВ радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера» на трассах «Новосибирск – Улан-Удэ» и «Комсомольск-на-Амуре – Улан-Удэ» во время магнитных бурь и солнечных вспышек 31 августа - 12 сентября 2017 года // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 8-16. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-8-16

For citation: Bashkuev Yu. B., Advokatov V. R., Buyanova D. G., Pushkarev M. G. Dembelov M. G. Analysis of the propagation conditions of radio waves add-ons in the Earth-ionosphere waveguide on the Novosibirsk-Ulan-Ude and Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude routes during magnetic storms and solar flares August 31 - September 12, 2017, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **25**: 5, 8-16. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-8-16

Поступила в редакцию / Original article submitted: 28.11.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-8-16

ATMOSPHERE PHYSICS

PACS 41.20.Jb

**ANALYSIS OF THE PROPAGATION CONDITIONS OF
VLF RADIO WAVES ADD-ONS IN THE
EARTH-IONOSPHERE WAVEGUIDE ON THE
NOVOSIBIRSK-ULAN-UDE AND
KOMSOMOLSK-ON-AMUR-ULAN-UDE ROUTES
DURING MAGNETIC STORMS AND SOLAR FLARES
AUGUST 31 - SEPTEMBER 12, 2017¹**

**Yu. B. Bashkuev, V. R. Advokatov, D. G. Buyanova,
M. G. Pushkarev, M. G. Dembelov**

Institute of physical materials science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str. 6
E-mail: buddich@mail.ru

An analysis of the amplitude and additional phase φ_{add} of the additional field of the VLF ADN RNS RSDN-20 field during strong magnetic storms and solar flares from September 1-12, 2017 was carried out. Paths of the latitudinal strike were investigated: 1 “Novosibirsk - Ulan-Ude”, length - 1580 km; 2 “Komsomolsk-on-Amur - Ulan-Ude”, length - 2080 km. Daily variations of the median amplitude of radio signals of 11.9 and 14.88 kHz on tracks 1 and 2, obtained after decimation and transmission of the measurement array through the digital smoothing polynomial Savitsky – Golay filter, are considered. The field calculations in the Earth-ionosphere waveguide are presented. Analysis of the propagation conditions of radio waves during magnetic storms and solar flares revealed significant differences in the spatial amplitude-phase phenomena in normal and anomalous geomagnetic conditions at frequencies of 11.9 and 14.88 kHz when propagating along spatially separated paths of latitudinal strike. The main factor influencing the parameters of the VLF signal in the Earth-ionosphere waveguide during heliogeophysical disturbances is the increase in the electron concentration in the *D* layer of the ionosphere and the associated change in the waveguide geometry.

Key words: magnetic storms, waveguide, ionosphere, solar flares

© Bashkuev Yu. B. et al., 2018

¹The article was prepared on the state budget project 336-2016-0002 “Propagation of radio waves in non-uniform impedance channels” and was partially supported by the RFBR grant No. 18-47-030006 p_a.