

## ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СДВ РАДИОСИГНАЛОВ ВО ВРЕМЯ СЕРИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

А.С. Полетаев, А.Г. Ченский

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия  
sardaukar9@yandex.ru

## VARIATIONS IN PARAMETERS OF VLF RADIO SIGNALS DURING SOLAR FLARES IN SEPTEMBER 2017

A.S. Poletaev, A.G. Chensky

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia  
sardaukar9@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются внезапные амплитудные и фазовые аномалии сверхдлинных радиоволн, возникающие вследствие возмущений нижней ионосферы во время солнечных вспышек. Показаны результаты измерений параметров СДВ радиосигналов для событий в сентябре 2017 г. Выполнена оценка статистической зависимости ВФА и ВАА от мощности излучения, измерена продолжительность стабилизации амплитуды и фазы после короткого воздействия повышенного ионизирующего излучения в течение 6–7 мин.

**Ключевые слова:** СДВ, ионосфера, солнечные вспышки.

**Abstract.** The article presents sudden amplitude and phase deviations of very low frequency radio waves associated with the lower ionosphere disturbances during solar flares. The results of VLF radio signals parameters measurements are shown for events in September 2017. Estimation of statistical dependence of amplitude and phase deviations on solar flare power have been done. Also we have measured the duration of signals parameters recovery period after short (6–7 minutes) solar flares.

**Keywords:** VLF, ionosphere, solar flares.

### ВВЕДЕНИЕ

Динамика изменений параметров ионосферы характеризуется совокупным взаимодействием Солнца и космических лучей галактического происхождения с геосферными оболочками. При этом на медленно меняющиеся периодические вариации накладываются быстрые нерегулярные процессы [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Основным источником ионизации D слоя ионосферы в спокойные дни служат излучение линий Лайман- $\alpha$  (1215.67 Å), ионизирующее молекулы NO на высотах выше ~70 км [Jones, 2016], и галактические космические лучи, воздействующее на все типы нейтральных молекул на высотах ниже ~70 км [Thomson et al., 2017].

В результате солнечной вспышки существенно возрастает электронная концентрация в ионосфере, а высота слоя уменьшается. При анализе событий, связанных с солнечными вспышками, обычно используют данные измерений спутников GOES об интенсивности жесткого (0.05–0.4 нм) и мягкого (0.1–0.8 нм) рентгеновского излучения [Лившиц, 2008].

Эффективным способом наблюдения эффектов солнечных вспышек в нижних слоях ионосферы является наклонное зондирование СДВ-ДВ радиосигналами. При помощи разработанного в ИРНТУ аппаратно-программного комплекса [Полетаев и др., 2015] непрерывно в трех пунктах ведутся интерферометрические измерения амплитуды и фазы сигналов навигационных ОНЧ-передатчиков. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований поведения СДВ-радиосигналов во время вспышек.

### СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В 2017 г.

В сентябре 2017 г. произошло одно из очень редких событий на Солнце. На фоне минимума солнечной активности в течение недели произошла череда

сильнейших за последние 12 лет вспышек: X9.3, X8.2, X2.2, X1.3. Вспышечная активность достигла 10.3 баллов, а в результате выброса солнечного вещества в направлении Земли, произошла серия магнитных бурь вплоть до очень сильных класса G4. Результаты измерений в этот период в п. Теплоэнергетик показаны на рис. 1. Несмотря на то, что вспышки X класса произошли в вечернее время, эффект их воздействия на принимаемые ОНЧ радиосигналы 6 сентября 2017 г. был колоссальный.

Стоит отметить, вспышки 8 сентября 2017 г. класса M и C, которые, с одной стороны, следовали друг за другом на протяжении всего дня практически с равными интервалами времени, а с другой стороны присутствовали очень короткие вспышки, что позволяет оценить скорость рекомбинационных процессов. Продолжительность стабилизации амплитуды (от пикового уровня к изначальному) после короткого воздействия повышенного ионизирующего излучения 6–7 мин варьируется для разных трасс от 21 до 47 мин. Начало вспышки хорошо совпадает по времени с началом роста амплитуды сигналов, а максимум амплитуды наступает с задержкой 0.5–2 мин.

Особым образом вспышки X-класса повлияли на амплитуду сигнала станции VTX3 (18.2 кГц), где получился обратный эффект: амплитуда во время вспышки уменьшилась. Такое поведение амплитуды сигнала 18.2 кГц зарегистрировали все три приемника интерферометра, следовательно, этот эффект не связан с местными противофазными шумами приемников. Кроме того, сигнал близкой по частоте станции RDL 18.1 кГц хорошо отфильтрован и не повлиял на результат измерений. Мощность передатчика VTX не понижалась, слабый сигнал на частоте 18.2 кГц имел положительные всплески амплитуды по данным онлайн приемника в Киле (Германия) [<http://www.df3lp.de>].

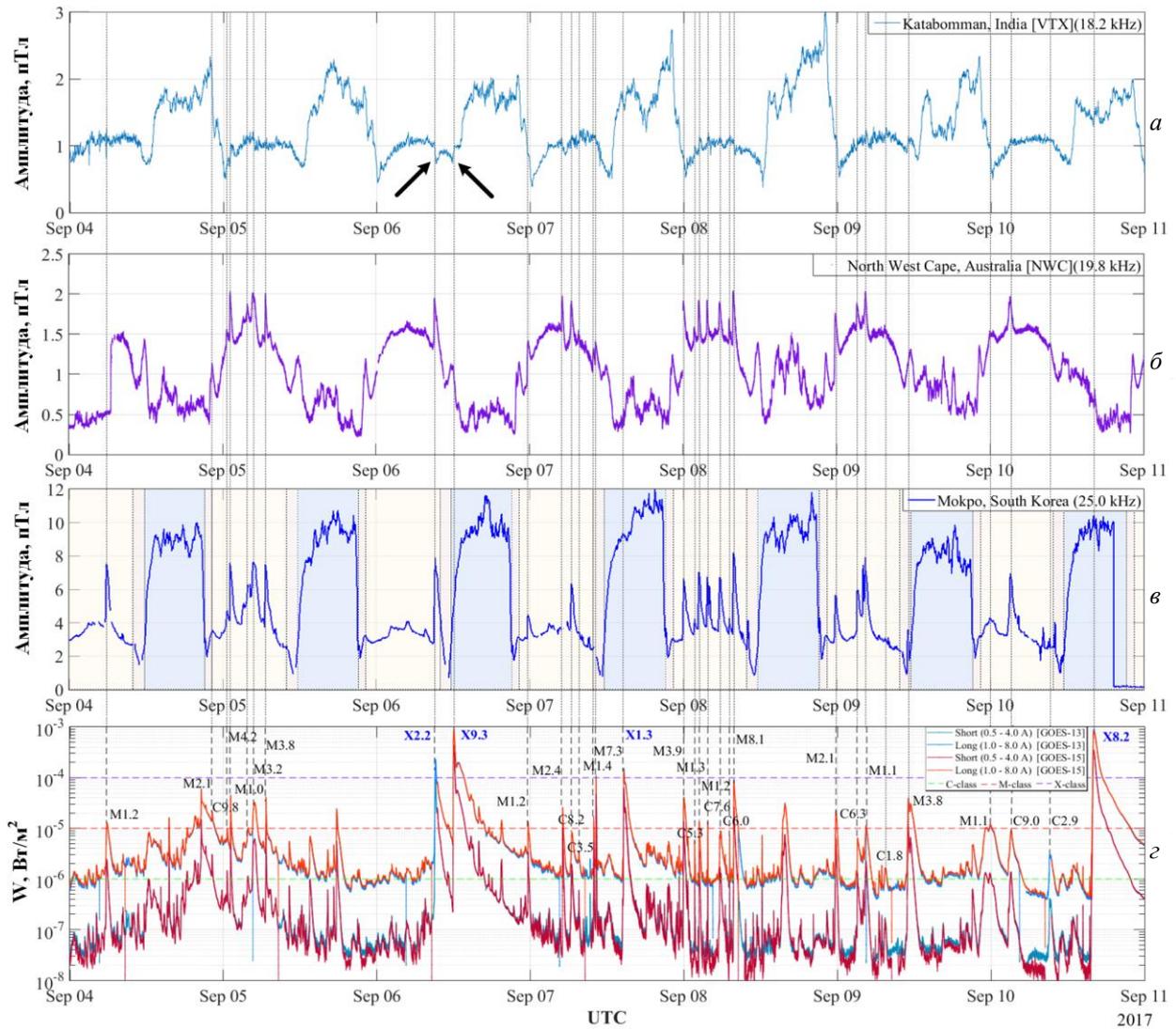


Рис. 1. Воздействие солнечных вспышек на амплитуду СДВ-сигналов в сентябре 2017 г. по данным наблюдений в п. Теплоэнергетик: VTX 18.2 кГц (а); NWC 19.8 кГц (б); Mokpo 25.0 кГц (в); рентгеновое излучение по данным GOES (г)

Эффект с отрицательными амплитудными всплесками также зарегистрирован 7–10 сентября онлайн-приемником в Мюре [https://sidstation.lou-det.org] для сигналов станций NRK (37.5 кГц), GBZ (19.58 кГц) и TBB (26.7 кГц) для вспышек X1.3, M7.3, M8.1, M2.9, M3.7, X8.2. Отрицательные всплески сигнала GBZ при этом произошли также для вспышек C5.9 и C2.9. Данный эффект не проявился для более короткой трассы станции ICV (20.27 кГц) и для близкой по расположению к передатчику GBZ станции GQD (22.1 кГц). Схожие явления были продемонстрированы в [Поклад и др., 2015] для станций DHO, ICV, GQD.

Принимая во внимание данные события, получается, что возникновение отрицательных всплесков амплитуды не зависит от частоты и проявляется при определенных условиях геометрии распространения сигналов. Заметное уменьшение высоты отражения при сильных вспышках, вероятно, создает условия для устойчивого распространения двумя модами и в дневное время, а эффект стоит относить к интерференционному подавлению.

Сводный график по количественной оценке внезапных амплитудных аномалий (БАА) во время

вспышек в сентябре 2017 г. показан на рис. 2. Отношение пикового значения амплитудного всплеска к уровню сигнала непосредственно перед вспышкой  $\delta A$  в большей мере является функцией пикового уровня  $W$  и меньше зависит от зенитного угла  $\cos\chi$ . Поскольку амплитуда сигнала  $A \sim W \cos\chi$ , то показанная на рис. 2, в зависимость  $\delta A = f(\delta W)$ , снижает влияние  $\cos\chi$  на результат построения.

### ВНЕЗАПНЫЕ ФАЗОВЫЕ АНОМАЛИИ СДВ СИГНАЛОВ

Наиболее ярко эффект-событий сентября 2017 г. проявляется в динамике внезапных фазовых аномалий (ВФА). На рис. 3 соотнесены дневные вариации фазы сигнала станции NWC и поток мощности рентгеновского излучения 1–8 Å (линии синим цветом — данные GOES-13, красным — GOES-15). Как видно, фаза сигнала очень чувствительна даже к малейшим изменениям интенсивности рентгеновского излучения.

При более детальном рассмотрении периода восстановления фазы после вспышки M1.2 (рис. 4)

Вариации параметров СДВ радиосигналов во время серий солнечных вспышек в сентябре 2017 г.

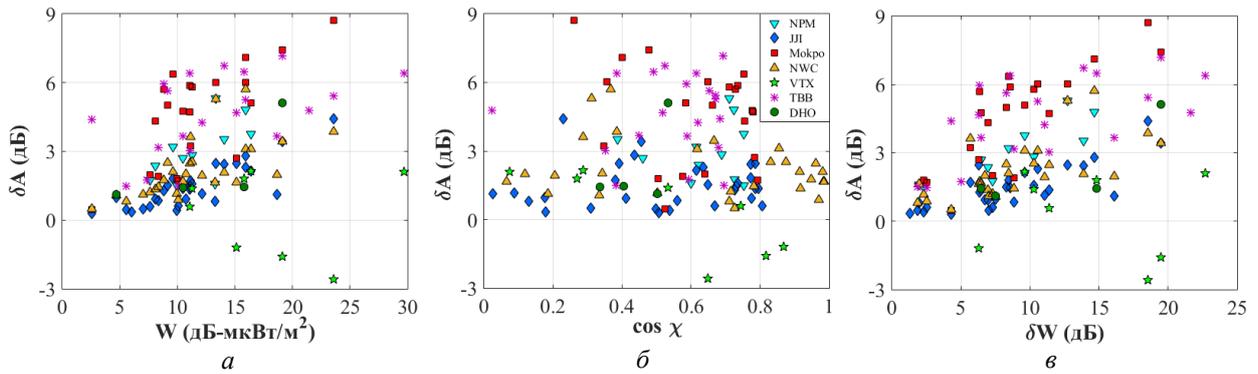


Рис. 2. Количественная оценка вариаций амплитуды СДВ-сигналов во время солнечных вспышек в сентябре 2017 г.: прирост амплитуды  $\delta A$  в зависимости от пиковой мощности вспышки  $W$  (а);  $\delta A$  по отношению к косинусу зенитного угла  $\chi$  на середине трассы (б);  $\delta A$  в зависимости от относительного прироста мощности мягкого рентгеновского излучения  $\delta W$  (в)

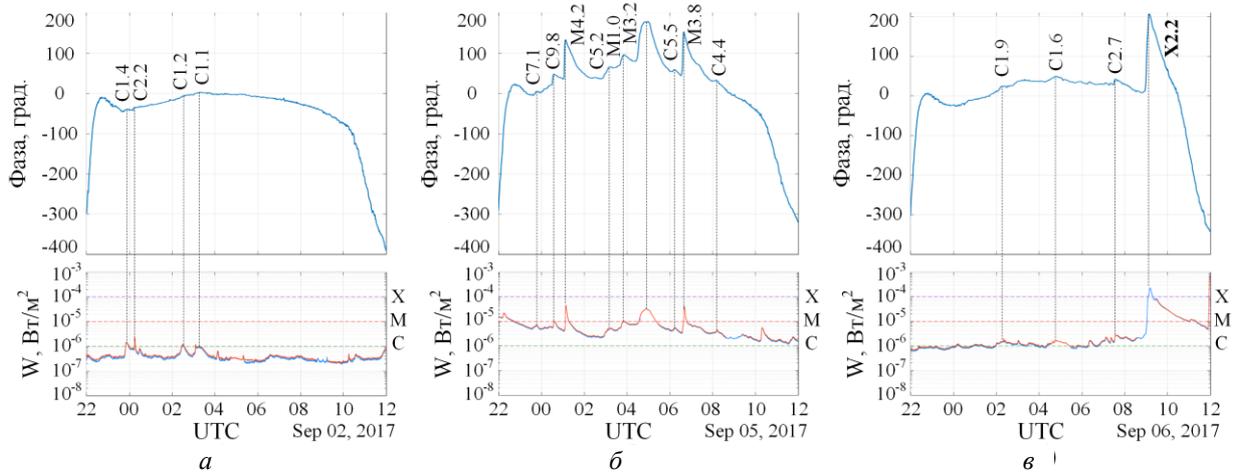


Рис. 3. Внезапные фазовые аномалии сигнала 19.8 ГГц (NWC) в сентябре 2017 г.: 02.09.2017 (а); 05.09.2017 (б); 06.09.2017 (в)

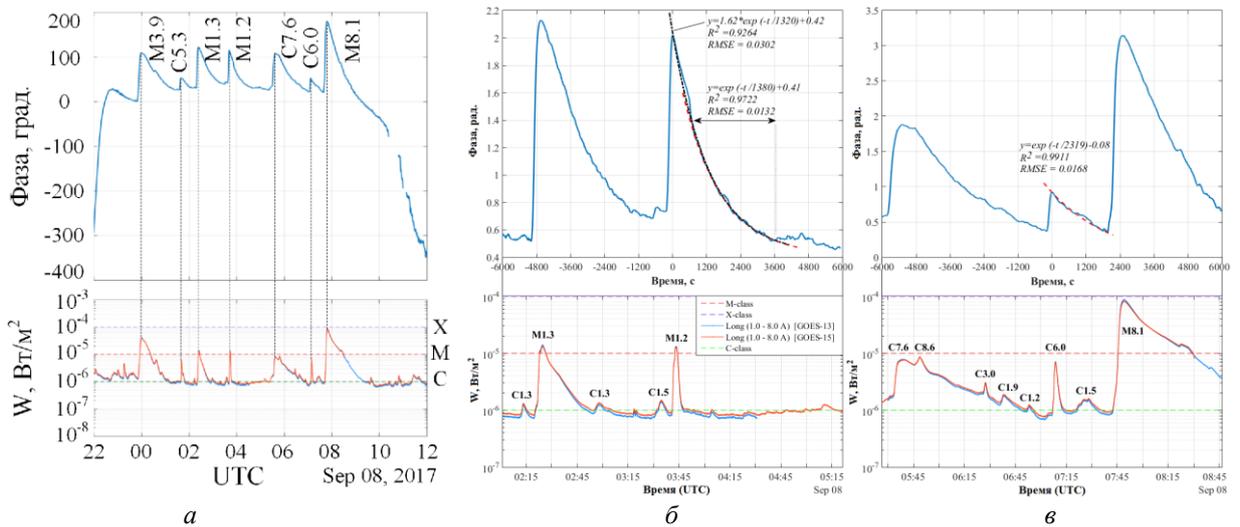


Рис. 4. ВФА сигнала станции NWC (19.8 ГГц) и рентгеновское излучение 1–8 Å во время солнечных вспышек 08.09.2017: серия вспышек (а); вспышка M1.2 (б); вспышка C6.0 (в)

заметно, что фазовый дрейф происходит в редко наблюдаемых условиях: вспышка оказывала непродолжительное воздействие с приблизительно постоянным в течение 1 ч уровнем рентгеновского излучения по ее окончании, угол  $\theta$  меняется слабо и составляет  $73.8^\circ$  во время вспышки и  $80.2^\circ$  через 1 ч

после нее ( $\cos \chi$  меняется от 0.960 до 0.985). Закон убывания фазы хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией с постоянной времени  $\tau = 1380$  с (23 мин). Вспышка C6.0 на рис. 3, б описывается экспоненциальным законом с постоянной времени  $\tau = 2319$  с (38.65 мин), однако, вспышка C1.5 после

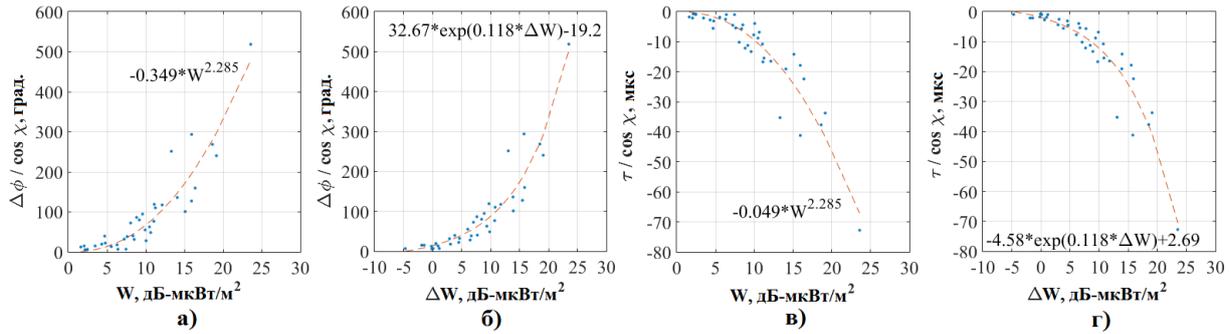


Рис. 5. Нормированное отклонение фазовой задержки сигнала станции NWC (19.8 кГц) во время солнечных вспышек в сентябре 2017 г.: прирост фазы  $\Delta\phi/\cos\chi$  в зависимости от пиковой мощности излучения  $\Delta W$  (б); фазовая задержка  $\tau/\cos\chi$  в зависимости от  $\Delta W$  (г); фазовая задержка  $\tau/\cos\chi$  в зависимости от  $W$  (в); фазовая задержка  $\Delta\phi/\cos\chi$  в зависимости от  $W$  (а)

нее создала нарушение стационарности условий наблюдений. Угол  $\theta$  для данного события варьируется от  $51.5^\circ$  до  $43.1^\circ$ .

Для описания поведения фазы во время совместного воздействия импульсного рентгеновского излучения и динамически меняющихся условий освещенности используют модель, в которой фаза, приведенная к единице длины трассы, варьируется по логарифмическому закону в зависимости от мощности  $\lg W$  и усредненного вдоль трассы зенитного угла  $\lg(\cos\chi)$  [Беленький и др., 2002; Орлов, Уваров, 2011; Козлов и др., 2015].

Сводный график зависимости отклонения фазы сигнала NWC, отнесенной к  $\cos\chi$  для середины трассы, показан на рис. 5. Аппроксимирующие функции подобраны при помощи метода наименьших квадратов с коэффициентом детерминации  $R^2 \approx 0.874$ . Распределение вариаций нормированного прироста фазы  $\Delta\phi$  характеризуется большим разбросом значений и, следовательно, большим среднеквадратичным отклонением от кривой тренда. Так же как и ВФА, нормированная на длину трассы [Беленький и др., 2003], наблюдаемая зависимость носит нелинейный характер. Полученное распределение изменений фазовой задержки сигнала  $\tau$  хорошо согласуется с результатами [Thomson et al., 2002].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения за ВАА и ВФА сигналов СДВ диапазона, возникающих в результате ионосферных возмущений из-за солнечных вспышек, являются одним из эффективных способов оценки динамики процессов в нижней ионосфере не только на высотах D-слоя, но и для высот 45–50 км, характеризующихся очень малой электронной концентрацией. Величина амплитудного и фазового всплеска зависит от мощности вспышки, угла падения ионизирующего излучения, а также от состояния ионосферы перед вспышкой.

При определенных условиях геометрии распространения сигналов очень мощные солнечные вспышки вызывают отрицательные всплески (уменьшение) амплитуды. Данные явления зарегистрированы различными СДВ приемниками у ОНЧ-сигналов разных частот. Заметное уменьшение высоты отражения при сильных вспышках, вероятно, создает условия для устойчивого распространения двумя модами в дневное время. Поэтому эффект уменьше-

ния амплитуды следует относить к интерференционному подавлению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беленький М.И., Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. О зависимости величины ВФА СДВ от зенитного угла Солнца на протяженных трассах в различных широтах // Материалы VIII Регион. конф. по распространению радиоволн, СПб, С.-Петербург. гос. ун-т, 29–30 октября 2002 г.
- Беленький М.И., Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. Моделирование ВИБ по ВФА СДВ и анализ сопутствующих амплитудных вариаций // Материалы IX Регион. конф. по распространению радиоволн, СПб, С.-Петербург. гос. ун-т, 28–30 октября 2003 г.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Козлов В.И., Корсаков А.А., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А. Адаптация параметров модели внезапных фазовых аномалий ОНЧ-сигналов радиостанций на трассах Новосибирск–Якутск и Краснодар–Якутск // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 43–50.
- Лившиц М.А. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы / под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского // Плазменная гелиогеофизика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 60–81.
- Орлов А.Б., Уваров А.Н. Модель нижней ионосферы для полуденных спокойных условий и условий внезапных ионосферных возмущений по данным о распространении СДВ // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 1. С. 80–89.
- Поклад Ю.В., Рыбаков В.А., Гаврилов Б.Г. Влияние рентгеновских вспышек на распространение радиоволн СДВ диапазона в ионосфере Земли: // Динамические процессы в геосферах: сборник тезисов докладов Школы молодых ученых, ИДГ РАН, Москва, 15 июня 2015. С. 57.
- Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А. Регистрация вариаций амплитуды и фазы сигналов навигационных СДВ передатчиков // Взаимодействие полей и излучения с веществом: Материалы трудов XIV Конференции молодых ученых, Иркутск, 14–18 сентября 2015. С. 252–255.
- Jones S.L. Solar Flares: Investigations and Selected Research / edited by Sarah L. Jones. NY. NOVA Science Publ., 2016. 156 p.
- Thomson N.R., Clilverd M.A., Rodger C.J. Midlatitude ionospheric D region: height, sharpness and solar zenith angle // J. Geophys. Res. 2017. V. 122, iss. 8. P. 8933–8946. DOI: [10.1029/2017JA024455](https://doi.org/10.1029/2017JA024455).
- Thomson N.R., Waldrom I, McRae W.M. D-region electron densities during solar flares from VLF radio measurements // XXVII<sup>th</sup> General Assembly of the International Union of Radio Science, Maastricht, the Netherlands, 17–24 August 2002. URL: <http://www.df3lp.de> (дата обращения 08.04.2019).
- URL: <https://sidstation.loudet.org> (дата обращения 10.04.2019).