

**ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ НАД ВОСТОЧНОЙ СИБИРЬЮ  
ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 12–15 АПРЕЛЯ 2016 г.****IONOSPHERIC DISTURBANCES OVER EASTERN SIBERIA  
DURING APRIL 12–15, 2016 GEOMAGNETIC STORMS****А.В. Рубцов**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, avrubcov@mail.ru  
Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, avrubcov@mail.ru*

**Б.М. Малецкий**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, maletskiy@iszf.irk.ru  
Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, maletskiy@iszf.irk.ru*

**Е.И. Данильчук**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, danilchuk.k@mail.ru*

**Е.Е. Смотров**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, katerina.smotrova@mail.ru*

**А.Д. Шелков**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, ekzereal@gmail.com*

**А.С. Ясюкевич**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru*

**A.V. Rubtsov**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, avrubcov@mail.ru  
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, avrubcov@mail.ru*

**B.M. Maletskii**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, maletskiy@iszf.irk.ru  
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, maletskiy@iszf.irk.ru*

**E.I. Danilchuk**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, danilchuk.k@mail.ru*

**E.E. Smotrova**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, katerina.smotrova@mail.ru*

**A.D. Shelkov**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, ekzereal@gmail.com*

**A.S. Yasyukevich**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** В работе на основе комплекса радиофизических и оптических инструментов выполнено исследование вариаций различных параметров ионосферы в периоды двух геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. Обе бури, для которых отсутствует внезапное начало, были вызваны высокоскоростными потоками частиц из корональной дыры. Несмотря на то, что интенсивность обеих бурь была невысокой ( $Dst \geq -55$  и  $Dst \geq -59$  нТл), выявлен отчетливый ионосферный отклик на данные возмущения. Во время главной фазы обеих бурь наблюдалось отрицательное возмущение электронной концентрации и критической частоты F2-слоя, причем для второй бури амплитуда отрицательного отклика была выше. Период отрицательного возмущения электронной концентрации сопровождался увеличением высоты максимума ионосферы, а также направленным вниз дрейфом плазмы в вечернее и ночное время, не характерным для спокойных условий. Во время бурь зарегистрированы резкие скачки индекса AATR (Along Arc TEC Rate) и выбросы шума полного электронного содержания в среднем в 2–2.5 раза, что свидетельствует об интенсификации мелкомасштабных ионосферных возмущений, вызванных беспокойной геомагнитной обстановкой и высокой суббуревой активностью.

**Ключевые слова:** ионосфера, ГНСС, радар некогерентного рассеяния, геомагнитные бури, ионосферные возмущения.

**Abstract.** We present the results of the complex study of ionospheric parameter variations during two geomagnetic storms, which occurred on April 12–15, 2016. The study is based on data from a set of radio-physical and optical instruments. Both the storms with no sudden commencement were generated by high-speed streams from a coronal hole. Despite the minor intensity of the storms ( $Dst \geq -55$  and  $-59$  nT), we have revealed a distinct ionospheric response to these disturbances. A negative response of electron density and F2-layer critical frequency was observed during the main phase of both the storms. The amplitude of the negative response was higher for the second storm. The period of negative electron density deviations was accompanied by an increase in the peak height, as well as by the downward plasma drift in the evening and night hours, which is not typical of quiet conditions. We have also recorded sharp peaks in the AATR (Along Arc TEC Rate) index and in total electron content noise spikes on average 2–2.5 times. This indicates an intensification of small-scale ionospheric disturbances caused by disturbed geomagnetic conditions and high substorm activity.

**Keywords:** ionosphere, GNSS, incoherent scatter radar, geomagnetic storms, ionospheric disturbances.

## ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера Земли является сложной динамической средой, состояние которой определяется большим количеством разнообразных факторов. Среди наиболее мощных возмущающих явлений, оказывающих существенное воздействие на динамику ионосферной плазмы, выделяют геомагнитные бури, связанные с проявлениями солнечной активности и резкими изменениями параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Данилов, 2013]. Геоэффективными источниками, приводящими к сильным магнитным бурям, являются корональные выбросы массы (coronal mass ejections — CME), а также коротирующие области взаимодействия (corotating interaction regions — CIR) и связанные с ними высокоскоростные потоки частиц, истекающие из корональных дыр [Yermolaev, Yermolaev, 2006].

Отклик верхней атмосферы Земли на геомагнитные возмущения представляет собой сложный комплекс разнообразных явлений, включающий изменения нейтрального состава термосферы (отношения концентраций  $O/N_2$ ) и системы циркуляции ионосферных ветров, генерацию крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, выпадения высокоэнергичных частиц в полярной области, проникновение магнитосферных токов и т. д. [Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Afraimovich et al., 2008; Astafyeva et al., 2016]. Вышеперечисленные факторы оказывают сильное воздействие на концентрацию электронов в ионосфере, что, в свою очередь, может приводить к серьезным помехам в работе различных радиотехнических и радионавигационных систем, использующих ионосферный радиоканал [Благовещенский, 2013; Демьянов, Ясюкевич, 2014; Котова и др., 2017]. Поэтому изучению ионосферных проявлений геомагнитных возмущений посвящается большое количество работ.

Отмечено, что отклик ионосферы на магнитное возмущение в определенном пункте может зависеть от локального времени, сезона [Fuller-Rowell et al., 1996], а также географических и геомагнитных координат. Для ионосферы средних широт типичная буря характеризуется положительной начальной фазой, которая сменяется более длительным и интенсивным отрицательным возмущением, называемым главной фазой бури. Показано, что в среднеширотной ионосфере в летнее время чаще наблюдается отрицательный отклик на геомагнитное возмущение, в то время как в зимнее время более вероятен положительный отклик, особенно в дневные часы [Wrenn et al., 1987; Buonsanto, 1999; Куркин и др., 2004]. Сезонные и суточные вариации ионосферных эффектов геомагнитных бурь связывают с асимметрией термосферного ветра и внутрисуточными отличиями реакции системы токов на геомагнитные возмущения (DC/AC-эффект) [Wrenn et al., 1987; Rodger et al., 1989]. Недавние исследования позволили выявить наличие интенсивных положительных возмущений электронной концентрации, которые наблюдаются в дневное время на третий-пятый

день после начала фазы восстановления геомагнитных бурь [Ратовский и др., 2018; Klimenko et al., 2018]. Авторы назвали указанные явления эффектом последствия магнитных бурь.

Каждая геомагнитная буря является уникальным явлением, которому могут быть свойственны различные характеристики. Поэтому, принимая во внимание всю сложность и комплексность ионосферных проявлений геомагнитных бурь, в настоящее время все более активно применяется мультиинструментальный подход к изучению данных явлений [Афраймович и др., 2002; Crowley et al., 2006; Balan et al., 2011; Astafyeva et al., 2015, 2017]. Использование большого набора разнообразных инструментов (наземных и спутниковых, радиофизических, оптических и т. п.) позволяет проследить всю цепочку явлений, возникающих в верхней атмосфере в периоды данных событий. При этом интерес представляют исследования ионосферных возмущений как в глобальном масштабе [Afraimovich et al., 2013; Astafyeva et al., 2014, 2017; Klimenko et al., 2017 и ссылки в работах], так и в отдельных регионах.

Регион Восточной Сибири характеризуется значительным смещением между географическими и геомагнитными координатами, определяющими соответственно распределения параметров нейтральной атмосферы и конфигурацию ионосферных токов и электромагнитного дрейфа ионосферной плазмы. Это обуславливает интерес к изучению ионосферных эффектов геомагнитных бурь для отдельных крупных изолированных событий [Kurkin et al., 2001; Леонович и др., 2013; Polekh et al., 2017] и проведение сравнительного анализа для бурь разной интенсивности [Романова и др., 2013; Золотухина и др., 2018; Kurkin et al., 2018].

В данной работе представлен сравнительный анализ ионосферных возмущений в Восточно-Сибирском регионе во время двух последовательных геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. на фазе спада 24-го цикла солнечной активности. Для анализа использовались данные о вариациях полного электронного содержания (ПЭС), полученные с наземных двухчастотных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), данные ионозонда DPS-4, данные Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР), а также оптические измерения широкоугольной высокочувствительной фотокамеры. Такой набор инструментов позволил с разных сторон изучить эффекты воздействия указанных бурь на ионосферу. В разделе 1 приведены параметры СВ и изменения геомагнитных индексов. В разделе 2 дан сравнительный анализ наблюдаемых ионосферных возмущений. В разделе 3 представлены результаты наблюдений эффектов бурь в оптическом диапазоне. В последнем разделе представлены заключение и обсуждение полученных результатов.

## 1. ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ И СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Рассматриваемый в работе период соответствует фазе спада 24-го цикла солнечной активности.

Обычно минимум солнечной активности характеризуется умеренными и слабыми ( $Dst \geq -100$  нТл) рекуррентными магнитными бурями, источники которых связаны с высокоскоростными потоками СВ из корональных дыр (CIR-бури) [Burlaga, Lepping, 1977]. Такие бури характеризуются постепенным развитием, поэтому у них, как правило, отсутствует внезапное начало (sudden storm commencement — SSC) [Loewe, Pröls, 1997].

Период 12–15 апреля 2016 г. характеризовался повышенным уровнем геомагнитной активности. В данное время наблюдались две последовательные CIR-бури, начало главной фазы которых было зарегистрировано в ~20:30 UT 12 апреля и в ~9:40 UT 14 апреля соответственно (рис. 1). Еще до начала первой бури имели место геомагнитные вариации ( $SYM-H \geq -20$  нТл, рис. 1, д).  $AE$ -индекс показал рост суббулевой активности с ~10:00 UT 12.04 (рис. 1, з) и превысил значение 1000 нТл к ~18:40 UT. Компонента  $B_z$  ММП имела в этот день преимущественно южное направление, при этом наблюдались сильные осцилляции (рис. 1, а). Скорость СВ  $V_{CB}$  с ~13:30 UT 12 апреля и до начала главной фазы первой бури составляла ~400 км/с (рис. 1, б). В то же время регистрировалось увеличение плотности СВ  $n_{CB}$  до  $52 \text{ см}^{-3}$  около 19:00 UT (рис. 1, в).

Начало главной фазы первой геомагнитной бури характеризовалось резким изменением направления  $B_z$  ММП на юг и падением плотности  $n_{CB}$  в ~20:30 UT 12 апреля (рис. 1, а). Одновременно с этим произошло увеличение  $V_{CB}$  до ~470 км/с (рис. 1, б), после чего  $V_{CB}$  продолжила постепенный рост, а  $n_{CB}$  опустилась до квазистабильного значения ~9  $\text{см}^{-3}$ .  $AE$ -индекс также стремительно возрос (рис. 1, з), индекс  $SYM-H$  начал уменьшаться (рис. 1, д). Во время главной фазы первой бури, продолжавшейся около 8 ч,  $B_z$  ММП демонстрировала частые резкие перепады значений, однако оставалась в основном отрицательной. Эти резкие перепады сопровождалась положительными скачками  $V_{CB}$  и  $AE$ , вызывая суббури.  $AE$  достиг максимума 1327 нТл в ~00:55 UT 13 апреля, а  $SYM-H$  опустился до ~70 нТл. Тогда же  $n_{CB}$  резко уменьшилась до ~5  $\text{см}^{-3}$ . Главная фаза бури завершилась в ~4:45 UT, когда  $SYM-H$  повторно достиг минимума ~70 нТл ( $Dst = -55$  нТл) (рис. 1, д).

На рис. 1, д видно, что фаза восстановления первой бури явно разделяется на два этапа: с быстрым (~04:45–10:10 UT 13 апреля) и медленным (~10:10 UT 13 апреля–07:40 UT 14 апреля) изменением индекса  $SYM-H$ . Следуя работе [Золотухина и др., 2018], будем называть период быстрого изменения индекса  $SYM-H$  на восстановительной фазе ранней фазой восстановления, а медленного — поздней.

На протяжении ранней фазы восстановления, до ~10:10 UT 13 апреля,  $B_z$  ММП находилась около 0 нТл, а  $V_{CB}$  достигла своего максимума 650 км/с в ~8:00 UT (рис. 1, б). Позднюю фазу восстановления первой бури можно рассматривать и в контексте приближения второй бури. Отметим, что поведение  $B_z$  ММП перед второй бурей было более спокойным, чем перед первой. На этот же временной интервал пришелся минимум суббулевой активности по дан-

ным  $AE$ . В ~7:40 UT произошло резкое увеличение  $V_{CB}$  с ~450 до ~490 км/с (рис. 1, б) и  $n_{CB}$  с ~3 до ~7  $\text{см}^{-3}$  (рис. 1, в). По сравнению с первой бурей отмечались повышенная  $V_{CB}$  и отсутствие сверхплотного потока протонов.

Главная фаза второй бури началась в ~9:40 UT 14 апреля с внезапного изменения направления  $B_z$  ММП на юг (рис. 1, а) и роста  $V_{CB}$  с ~470 до ~500 км/с (рис. 1, б). С развитием главной фазы второй бури произошло стремительное увеличение суббулевой активности по данным  $AE$ . Максимальное значение  $AE$  1261 нТл было достигнуто в ~12:35 UT 14 апреля, в это время зарегистрировано уменьшение  $SYM-H$  на 10 нТл (рис. 1, з).  $SYM-H$  достиг минимума ~68 нТл ( $Dst = -59$  нТл) в ~20:30 UT 14 апреля (рис. 1, д). Таким образом, главная фаза второй бури длилась на ~3 ч дольше, чем первой. Во время фазы восстановления второй бури  $SYM-H$  плавно увеличивался до ~15:00 UT 15 апреля. Небольшое повышение суббулевой активности на фазе восстановления второй бури наблюдалось с ~00:50 до ~2:25 UT 15 апреля, после этого величина  $AE$  опустилась до спокойного уровня. Вся фаза восстановления второй бури длилась ~18.5 ч, в то время как фаза восстановления первой бури не завершилась по причине начала второй бури.

Обычно бури, вызванные CIR и/или следующими за ними высокоскоростными потоками, повторяются через 27 дней. Для бури 12–15 апреля 2016 г. повтор произошел 8–11 мая 2016 г., когда наблюдалась сильнейшая за 2016 г. геомагнитная буря (основное возмущение 8 мая). Таким образом, эти бури относятся к классу рекуррентных.

Далее мы рассматриваем возмущения в ионосфере, вызванные геомагнитными бурями 12–15 апреля 2016 г. Для лучшего понимания эффектов во время бури мы сравниваем наши результаты с опорным днем 9 апреля 2016 г., который входит в списки наиболее спокойных дней месяца SK-days, International Q-days и D-days [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html].

## 2. ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Изучение воздействия геомагнитных бурь и суббурь на среднениротную ионосферу, проявляющегося в виде возмущений концентрации электронов, выполнено по данным комплекса научных инструментов, расположенных в Восточной Сибири. По измерениям ионозонда вертикального зондирования DPS-4 [Reinisch et al., 1997], расположенного в Иркутске ( $52^\circ \text{ N}$ ;  $104^\circ \text{ E}$ ), получены данные о вариациях критической частоты  $f_oF2$  и высоты максимума F2-слоя  $h_mF2$  ионосферы. Ионограммы обрабатывались вручную [Piggott, Rawer, 1972].

Непосредственные измерения  $N_e$  в диапазоне высот 150–600 км и скорости вертикального ионосферного дрейфа  $v_z$  осуществлялись с помощью ИРНР ( $53^\circ \text{ N}$ ;  $103^\circ \text{ E}$ ) [Жеребцов и др., 2002; Potekhin et al., 2009]. Методики расчета  $N_e$  и  $v_z$  дрейфа по данным радара описаны в работах [Alsatkin et al., 2009; Shcherbakov et al., 2015].

В работе анализируются также данные вариаций ПЭС с двухчастотных приемников ГНСС, входящих

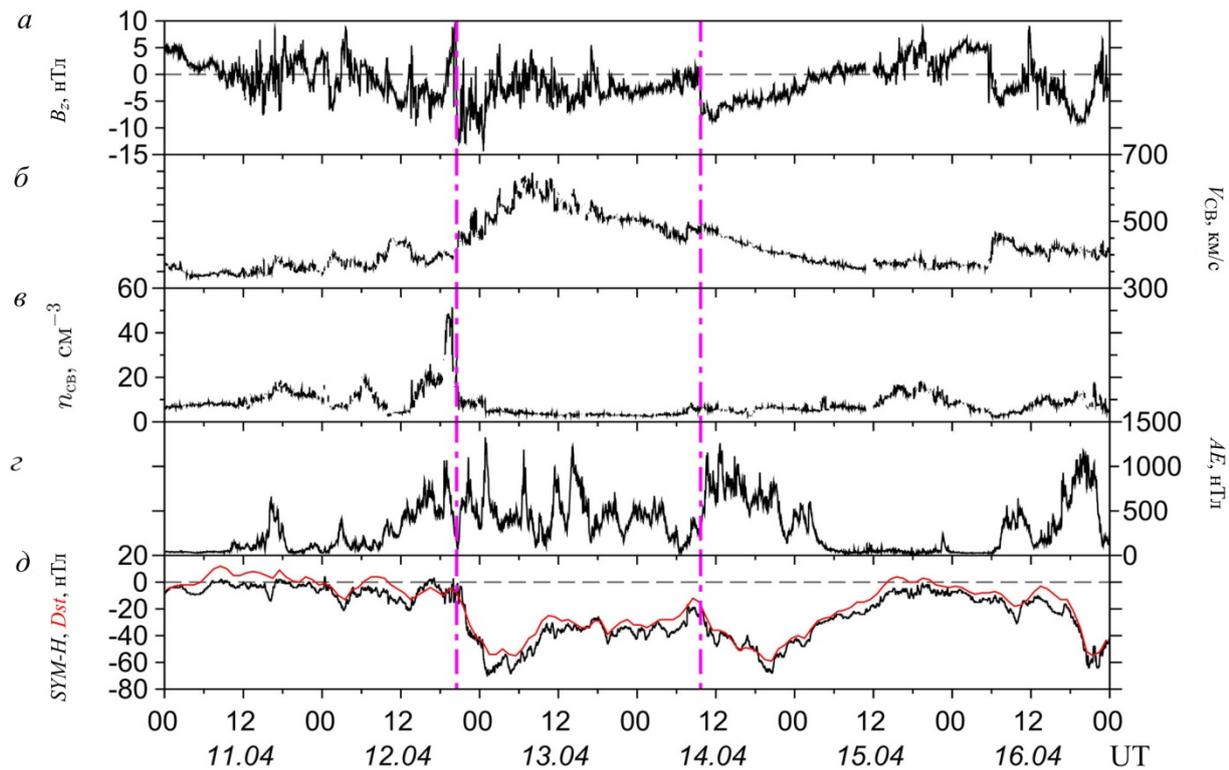


Рис. 1. Межпланетные и геомагнитные условия в период 11–16 апреля 2016 г.: *a* —  $B_z$  ММП, *б* — скорость солнечного ветра  $V_{св}$ , *в* — плотность солнечного ветра  $n_{св}$ , *г* —  $AE$ -индекс, *д* — индексы  $SYM-H$  (черная линия) и  $Dst$  (красная линия). Вертикальные штрихпунктирные линии обозначают время начала главной фазы бурь

в международную базу IGS [Dow et al., 2009]: IRKJ, IRKM (Иркутск,  $52^\circ N$ ;  $104^\circ E$ ) и BADG (пос. Бадары,  $51^\circ N$ ;  $102^\circ E$ ). В качестве критерия оценки интенсивности вариаций ПЭС использовался индекс  $ROTI$  (Rate Of TEC Index), представляющий собой дисперсию скорости изменения ПЭС [Pi et al., 1997]. Ряды  $ROTI$  усреднялись в диапазоне 5 мин. Для учета зависимости данного индекса от угла места  $\theta$  и приведения всех данных к квазивертикальным значениям использовалась функция преобразования  $M(\epsilon)$  (подробное описание см. [Sanz et al., 2013]). В результате был получен индекс  $AATR$  (Along Arc TEC Rate) [Juan et al., 2018]. Временное разрешение индекса  $AATR$  соответствует разрешению рядов индекса  $ROTI$ .

На основе данных ГНСС анализировалась динамика выбросов шума ПЭС. Для расчета данного параметра из исходных рядов ПЭС удаляется тренд для исключения эффектов движения спутника и выполняется обрезка рядов по углу места ( $\theta \geq 30^\circ$ ). Затем рассчитывается вторая производная ПЭС, что позволяет исключить медленные вариации (сезонные, суточные, приливные и т. п.). В результате остается только аддитивный белый гауссовский шум. Значения шума, выходящие за порог  $3\sigma$ , считаются выбросами шума.

Отметим, что местное время в Иркутске  $LT=UT+7$ .

На рис. 2 показаны вариации  $f_oF2$  и  $h_mF2$  ионосферы по измерениям ионозонда в Иркутске 11–16 апреля 2016 г. на фоне динамики этих параметров в опорный день. На рис. 3 показаны высотно-временные

распределения  $N_e$  на высотах 150–600 км (*a*), изменения скорости вертикального ионосферного дрейфа  $v_z$  на высоте 300 км (черная линия) и 350 км (красная линия) (*б*), а также динамика температур ионов (*в*) и электронов (*г*) 11–15 апреля 2016 г. по данным ИРНР. Временное разрешение  $v_z$  и температуры составляет 5 мин, всех остальных параметров — 15 мин.

В период повышения суббуревой активности 12 апреля регистрировалось увеличение  $f_oF2$  по сравнению со значениями в опорный день (рис. 2, *a*), составившее  $>1$  МГц перед началом главной фазы первой бури. После начала главной фазы и в течение суток 13 апреля наблюдалось уменьшение  $f_oF2$ , сопровождаемое незначительным ростом  $h_mF2$  (на  $\sim 20$  км). На высотно-временных распределениях  $N_e$  по данным ИРНР 13 апреля также отчетливо наблюдается понижение  $N_e$  на  $(1\div 2)10^5 \text{ см}^{-3}$  (рис. 3, *a*). При этом поведение вертикального дрейфа плазмы отличалось от спокойного суточного хода. С  $\sim 20:00$  UT ионосферная плазма быстро опускалась вниз со скоростью до 35 м/с на высоте 300 км и до 25 м/с на высоте 350 км (в два раза быстрее, чем в спокойных условиях). Опускание плазмы регистрировалось до  $\sim 00:00$  UT (рис. 3, *б*). Отметим, что с  $\sim 10:00$  UT 13 апреля до  $\sim 01:00$  UT 14 апреля на ионограммах наблюдался эффект F-рассеяния (рис. 4, *a*), свидетельствующий о присутствии в ионосфере крупномасштабных неоднородностей.

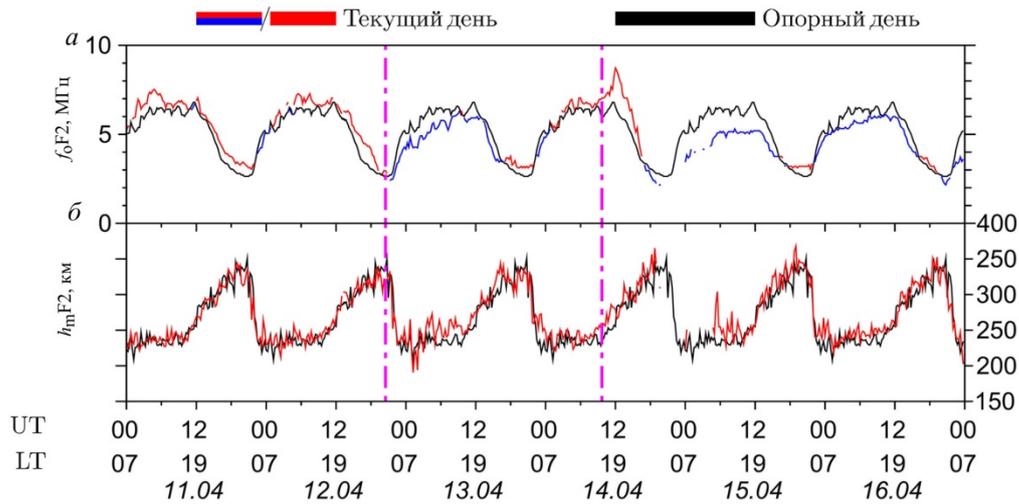


Рис. 2. Вариации параметров F2-слоя ионосферы 11–16 апреля 2016 г.: *a* — критическая частота  $f_0F2$  выше (красная линия) и ниже (синяя линия) значений в опорный день (черная линия); *b* — высота максимума  $h_mF2$  (красная линия) и значения в опорный день (черная линия)

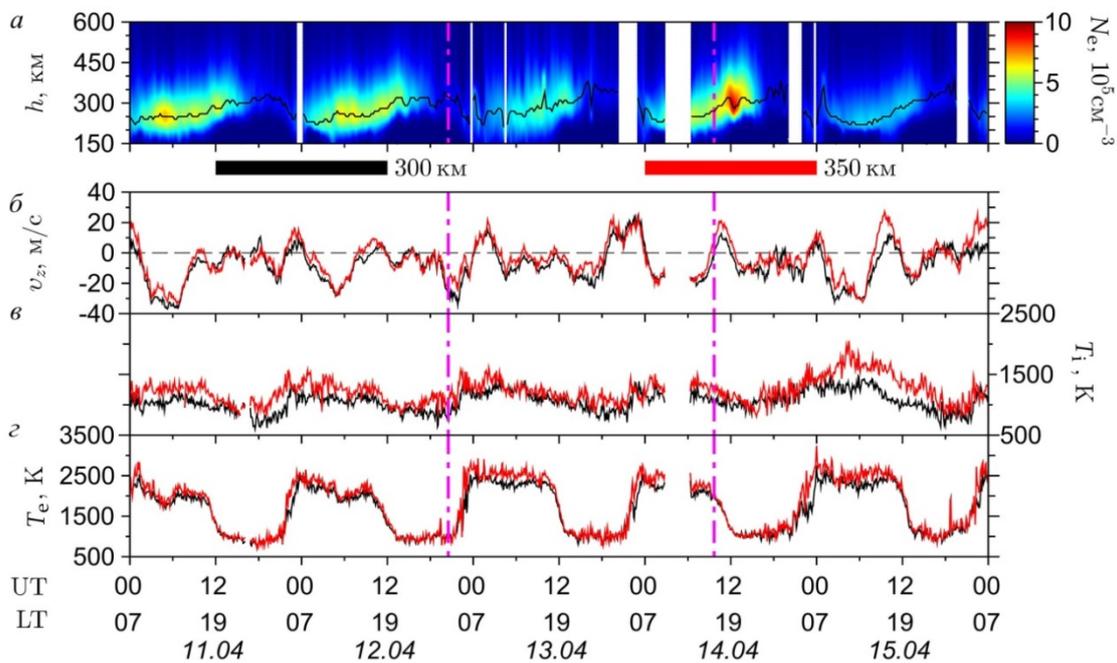


Рис. 3. Вариации ионосферных параметров 11–15 апреля 2016 г. по данным ИРНР: *a* — концентрация электронов  $N_e$  на высотах 150–600 км с шагом 10 км и высота максимума концентрации (черная линия); *b* — скорость вертикального ионосферного дрейфа  $v_z$ ; *c* — температура ионов  $T_i$ ; *d* — температура электронов  $T_e$  на высоте 300 км (черная линия) и 350 км (красная линия)

Наиболее существенные по амплитуде ионосферные вариации были зарегистрированы во время начала главной фазы второй бури. На рис. 2 видно, что после ~09:40 UT наблюдается скачкообразный рост  $f_0F2$  на ~3 МГц относительно уровня в спокойный день. Исходя из данных радара, увеличение  $N_e$  наблюдалось на высотах от 200 до 400 км, максимальное значение  $N_e$  на высоте 300 км составило  $9.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , что превышает значение для опорного дня в 1.5 раза (рис. 3, *a*). Одновременно наблюдался положительный скачок в скорости дрейфа ионосферной плазмы.

По мере дальнейшего развития бури с 16:45 UT положительное возмущение  $f_0F2$  сменилось на отрицательное, а с ~20:00 UT после минимума

$f_0F2 \approx 2.2$  МГц, на ионограммах пропали отражения, т. е. началось интенсивное поглощение — блэкаут. Существенно пониженные относительно спокойного дня значения  $f_0F2$  и  $N_e$  наблюдались и на всей фазе восстановления бури 15 апреля, а в суточном ходе  $N_e$  пропал околоразуденный максимум (рис. 2, *a*). Пониженные значения  $f_0F2$  сохранялись также 16 апреля. При этом интенсивность отрицательного ионосферного отклика была выше, чем для первой бури, до 2 МГц в  $f_0F2$ . Период отрицательного возмущения  $f_0F2$  сопровождался увеличением  $h_mF2$  над уровнем опорного дня до +55 км (рис. 2, *b*). Отметим также, что в вечерние и ночные часы 14–15 апреля наблюдались преимущественно отрицательные

скорости дрейфа плазмы (рис. 3, б), а модуль  $v_z$  достигал  $\sim 32$  м/с, что не характерно для спокойных условий [Altadill et al., 2007].

Значения температур ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$  (рис. 3, в, г) на различных высотах были получены по данным ИРНР по методике, описанной в работе [Ташлыков и др., 2018]. Величина  $T_e$  практически не отклонялась от своего спокойного суточного хода во время рассматриваемых геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. (рис. 3, г). Для ионов регистрировалось увеличение температуры на восстановительной фазе бурь, 13 и 15 апреля (рис. 3, в). Причем для второй бури положительное отклонение выражено более существенно (до  $+200$  К в период  $\sim 00:00$ – $15:00$  UT 15 апреля относительно спокойного дня 11 апреля).

Вариации пространственно усредненного индекса  $AATR$  по станциям IRKJ, IRKM и BADG отражают изменения интенсивности мелкокомасштабных неоднородностей ионосферы в рассматриваемом регионе. Перед началом первой бури величина индекса  $AATR$  находилась на уровне опорного дня. Его повышение началось в период главной фазы первой бури 13 апреля, а в  $\sim 4:45$  UT (минимум  $SYM-H$ ) произошел резкий скачок значений  $AATR$  (рис. 4, б). Далее наблюдались еще несколько подъемов  $AATR$ . Во время второй бури регистрировались скачки в начале главной фазы ( $\sim 10:00$  UT 14 апреля) и после максимума  $N_e$  (рис. 3, а) в интервале  $\sim 12:00$ – $14:00$  UT. Более спокойный характер второй бури также проявил себя в отсутствии сильных флуктуаций  $AATR$  во время восстановительной фазы. В свою очередь, период фазы восстановления во время первой бури выделяется сильными возмущениями  $AATR$ , значения которого превышают уровень опорного дня в 6–9 раз. Эти возмущения начались в  $\sim 12:00$  UT 13 апреля и достигали экстремальных значений до  $\sim 16:30$  UT, после чего пошли на спад, во время которого значения  $AATR$  примерно в два раза превосходили значения в опорный день (сопоставимо с возмущениями во время главной фазы). Еще два резких скачка  $AATR$  до крайне высоких значений произошли в  $\sim 20:30$  и  $\sim 21:30$  UT. Постоянное превышение над уровнем опорного дня длилось до  $\sim 4:00$  UT 14 апреля. Этот временной интервал близок периоду наблюдения F-рассеяния на ионограммах (рис. 4, а).

Выбросы шума ПЭС являются индикатором присутствия мелкокомасштабных ионосферных неоднородностей, оказывающих влияние на сигнал ГНСС [Демьянов, Ясюкевич, 2014; Demyanov et al., 2019]. Анализируя данные шума ПЭС за период 12–15 апреля 2016 г., усредненные в каждый момент времени по приемникам IRKJ, IRKM, BADG, и рассматривая их отклонения от опорного дня, были определены моменты наибольших выбросов шума (рис. 4, в). Полученные результаты хорошо коррелируют с вариациями  $AATR$ , в частности, в интервале крайне высоких значений индекса с  $\sim 04:00$  до  $\sim 16:30$  UT 13 апреля на восстановительной фазе первой бури (рис. 4, б). Повышенные значения выбросов шума регистрировались также 14 апреля во время второй бури. Таким образом, выбросы шума и крайне высокие значе-

ния  $AATR$  свидетельствуют об интенсификации мелкокомасштабных ионосферных возмущений, вызванных неспокойной геомагнитной обстановкой и высокой суббуревой активностью. В среднем процент выбросов шума увеличивается в 2–2.5 раза относительно опорного дня.

### 3. ПРОЯВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Отдельный интерес представляет отклик атмосферы на геомагнитные возмущения в виде среднеширотных сияний. Исследована динамика интенсивностей эмиссии атомарного кислорода на длинах волн 557.7 и 630 нм. Максимумы этих эмиссий в атмосфере расположены на высотах около 97 и 270 км соответственно. Как правило, наиболее интенсивная эмиссия происходит на длине волны 630 нм, которая к тому же имеет прямую зависимость от величины  $Dst$  [Михалев, 2013]. Эту эмиссию часто рассматривают как индикатор изменений  $N_e$  и динамики верхней атмосферы при среднеширотных сияниях. В то же время нет единого мнения насчет зависимости интенсивности эмиссии 557.7 нм от величины геомагнитной активности [Леонович и др., 2012]. В качестве контрольного параметра рассматривалась интенсивность атмосферного свечения на длине волны 470 нм.

Для изучения интенсивности эмиссий использовалась широкоугольная высокочувствительная фотокамера ФИЛИН-1Ц, установленная в пос. Горы ( $52^\circ$  N;  $103^\circ$  E), с экспозицией 300 с. В исследуемый период времени 12–15 апреля 2016 г. камера работала каждый день с  $\sim 13:00$  до  $\sim 21:00$  UT, однако данные до  $\sim 14:00$  UT и после  $\sim 20:00$  UT не учитываются из-за сильного влияния заката/рассвета. Таким образом, для исследования использовались данные 13 апреля (фаза восстановления первой бури) и 14 апреля (главная фаза второй бури). Отметим, что в указанное время наблюдалась сильная облачность, а также высокое положение Луны. Эти факторы влияют на интенсивность излучения на всех длинах волн одинаково, поэтому не мешают выделить вариации интенсивности эмиссий на одной длине волны относительно другой.

Для исследования вариаций излучения вычислялось отношение разностей интенсивностей эмиссии 630 нм и двух других (557.7 и  $\sim 470$  нм) к интенсивности эмиссии 630 нм. Значительных отклонений по сравнению с опорным днем 13 апреля не обнаружено, хотя и наблюдались отдельные колебания эмиссии 630 нм в промежутке  $\sim 17:00$ – $18:00$  UT (рис. 5, а). Возмущения 14 апреля начинаются после  $\sim 18:00$  UT, а в  $\sim 19:30$  UT произошло пикообразное увеличение интенсивности эмиссии 630 нм относительно двух других. Повышенная интенсивность эмиссии 630 нм сохранялась до 14 апреля (рис. 5, б).

Учитывая, что эти бури являются слабыми, причиной увеличения интенсивности на длине волны 630 нм скорее всего являются столкновения атомов кислорода с тепловыми электронами ионосферы или диссоциативная рекомбинация [Тащилин, Леонович, 2016].

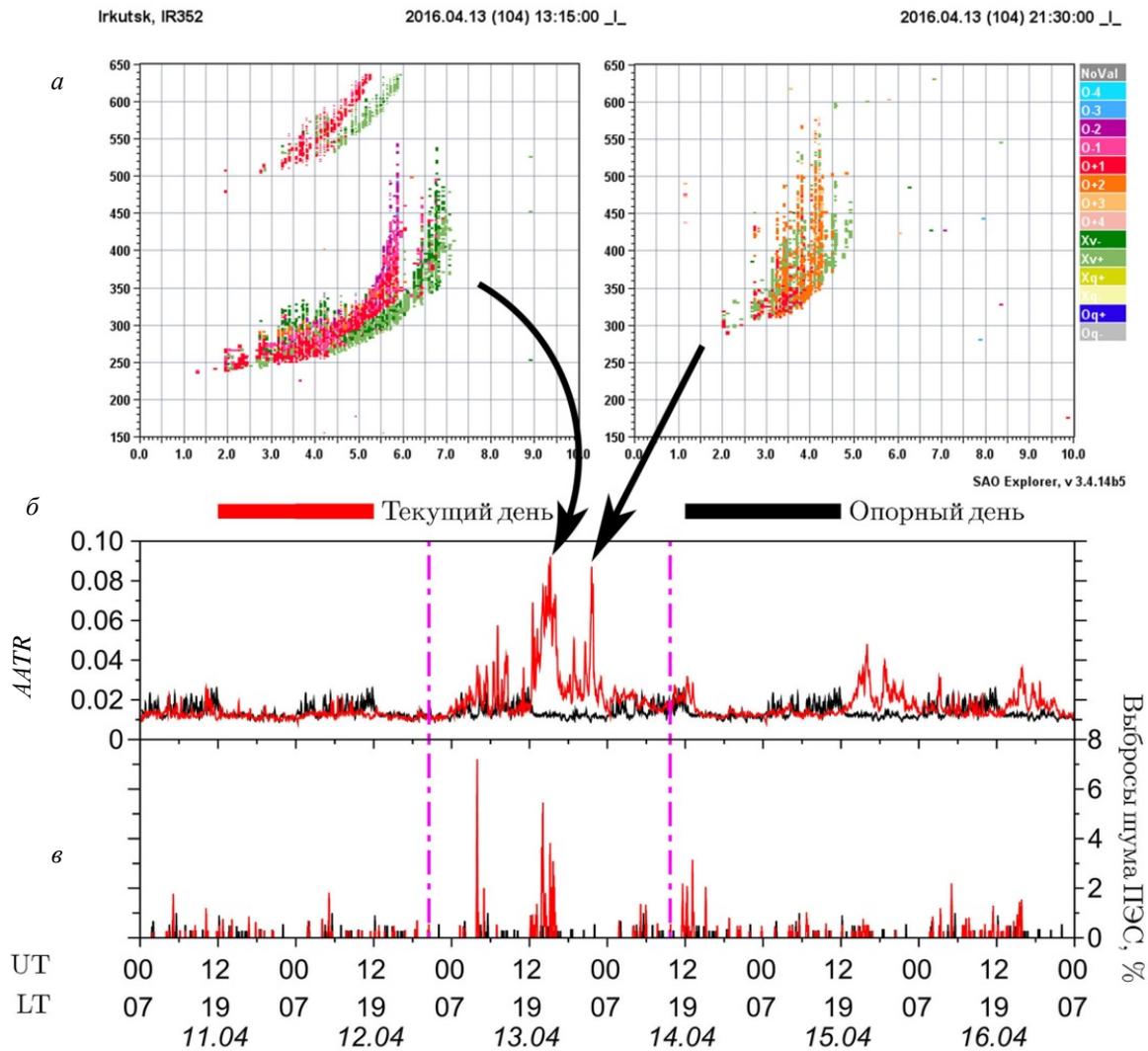


Рис. 4. Примеры ионограмм вертикального зондирования с эффектом F-рассеяния (а) в 13:15 UT (слева) и 21:30 UT 13 апреля (справа). Вариации индекса AATR (б) и выбросы шума ПЭС (в) 11–16 апреля 2016 г. (красная линия) на фоне динамики указанных параметров в опорный день (черная линия)

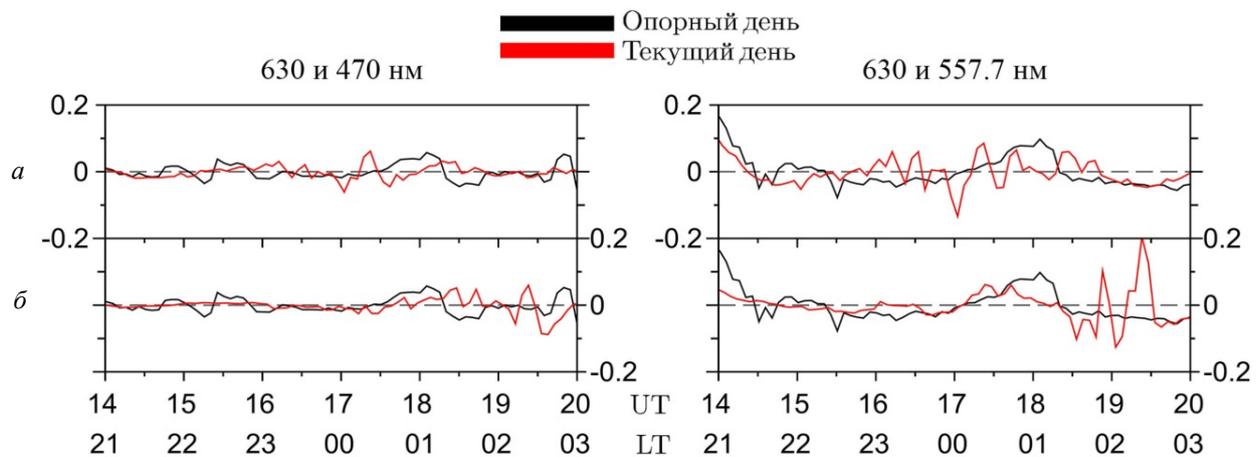


Рис. 5. Возмущения свечения 13 апреля (а) и 14 апреля (б): отношение разности интенсивности эмиссии 630 и 557.7 нм (справа), 630 и 470 нм (слева) к интенсивности эмиссии 630 нм (красная линия) на фоне значений в опорный день (черная линия)

Низким баллом бури можно объяснить также то, что мы не зарегистрировали усиление интенсивности эмиссии 557.7 нм, обычно наблюдаемое во время сильных геомагнитных бурь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе комплекса радиофизических и оптических инструментов выполнено исследование вариаций различных параметров ионосферы в периоды двух геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г.

Показано, что данные бури относились к классу рекуррентных бурь, для которых отсутствует внезапное начало. Источниками таких бурь на Солнце являются корональные дыры и связанные с ними высокоскоростные потоки плазмы.

Несмотря на то, что обе бури были относительно слабыми, выявлен отчетливый ионосферный отклик на данные возмущения. Во время главной фазы обеих бурь наблюдалось отрицательное возмущение электронной концентрации  $N_e$  и критической частоты  $f_oF_2$ . Причем для второй бури амплитуда отрицательного отклика была выше, уменьшение  $f_oF_2$  превышало 30 % относительно уровня спокойного дня. Это может объясняться тем, что вторая буря пришлось на период восстановления первой, когда ионосферная плазма уже была возмущена. Период отрицательного возмущения  $f_oF_2$  сопровождался увеличением высоты максимума ионосферы. Регистрировались также преимущественно отрицательные скорости дрейфа плазмы в вечернее и ночное время, что отличается от характерного поведения в спокойных условиях. После главной фазы второй бури наблюдалось также повышение температуры ионов на 200 К относительно спокойного дня, что свидетельствует об общем повышении температуры термосферы. Возрастание термосферной температуры во время геомагнитных бурь приводит к отрицательному отклику в среднеширотной ионосфере [Klimenko et al., 2017]. В период главной фазы второй бури выявлено также пикообразное увеличение интенсивности эмиссии 630 нм в атмосфере.

Интересной особенностью второй бури явился скачкообразный рост  $N_e$  в 1.5 раза во время начала главной фазы бури. Данное положительное возмущение наблюдалось около 7 ч в дневное время и сопровождалось значительными положительными скоростями вертикального дрейфа плазмы, не типичными для данного периода суток.

В рассматриваемый период зарегистрированы всплески значений индекса  $AATR$  и выбросов шума ПЭС, связанные с развитием мелкомасштабных неоднородностей. Указанные всплески имели большую интенсивность во время первой бури, когда наблюдалось F-рассеяние на ионограммах, но встречались чаще во время второй бури. В среднем процент выбросов шума увеличивался в 2–2.5 раза относительно опорного дня.

Авторы благодарят Ясюкевича Ю.В., Веснина А.М., Ташлыкова В.П., Васильева Р.В. и Ратовского К.Г. за советы и помощь в работе с данными при выполнении работы. Данные геомагнитных индексов, используемые в этой статье, получены с сайта

Всемирного центра геомагнитных данных (WDC for Geomagnetism) [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. В работе использовались данные уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [<http://ckp-rf.ru/usu/77733/>]. Данные Иркутского ионозонда получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>]. Расчет значений индекса  $AATR$  выполнен с помощью ресурса для автоматической обработки данных ГНСС [<http://simurg.iszf.irk.ru>] [Yasyukevich et al., 2018]. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П-16 (анализ динамики бури, данных ИРНР и оптических измерений), а также гранта Президента РФ № МК-3265.2019.5 (анализ вариаций шума ПЭС).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Яшкалиев Я.Ф., Аушев В.М. и др. Одновременные радиофизические и оптические измерения ионосферного отклика во время большой магнитной бури 6 апреля 2000 г. // Геомагнетизм и аэронаука. 2002. Т. 42, № 3. С. 383–393.
- Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53, № 4. С. 435–450. DOI: [10.7868/S0016794013040032](https://doi.org/10.7868/S0016794013040032).
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 1–33.
- Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
- Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339–1345.
- Золотухина Н.А., Куркин В.И., Полех Н.М. Ионосферные возмущения над Восточной Азией во время сильных декабрьских магнитных бурь 2006 и 2015 гг.: сходство и различие // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 3. С. 39–56. DOI: [10.12737/szf-43201805](https://doi.org/10.12737/szf-43201805).
- Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Влияние геомагнитной бури 26–30 сентября 2011 г. на ионосферу и распространение КВ-радиоволн. II. Распространение радиоволн // Геомагнетизм и аэронаука. 2017. Т. 57, № 3. С. 312–325. DOI: [10.7868/S0016794017030105](https://doi.org/10.7868/S0016794017030105).
- Куркин В.И., Пирог О.М., Полех Н.М. Циклические и сезонные вариации ионосферных эффектов геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэронаука. 2004. Т. 44, № 5. С. 634–642.
- Леонович Л.А., Михалев А.В., Леонович В.А. Проявление геомагнитных возмущений в свечении среднеширотной верхней атмосферы // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. С. 109–115.
- Леонович Л.А., Михалев А.В., Тащилин А.В. и др. Отклик параметров среднеширотной верхней атмосферы на геомагнитную бурю 21 января 2005 г. по данным оптических, магнитных и радиофизических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 75–80.
- Михалев А.В. Среднеширотные сияния в Восточной Сибири в 1991–2012 гг. // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 78–83.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистиче-

ский анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).

Романова Е.Б., Жеребцов Г.А., Ратовский К.Г. и др. Сравнение отклика F2-области ионосферы на геомагнитные бури на средних и низких широтах // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С. 27–30.

Ташлыков В.П., Медведев А.В., Васильев Р.В. Модель сигнала обратного рассеяния для Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 2. С. 55–65. DOI: [10.12737/szf-42201805](https://doi.org/10.12737/szf-42201805).

Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84. DOI: [10.12737/21491](https://doi.org/10.12737/21491).

Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P., Rатовский K.G. Large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin according to the data of the GPS network and ionosondes // Adv. Space Res. 2008. V. 42, iss. 7. P. 1213–1217. DOI: [10.1016/j.asr.2007.11.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.11.023).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather and Space Climate. 2013. V. 3. A27. DOI: [10.1051/swsc/2013049](https://doi.org/10.1051/swsc/2013049).

Alsatkin S.S., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Analyzing the characteristics of phase-shift keyed signals applied to the measurement of an electron concentration profile using the radiophysical model of the ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, iss. 7. P. 1022–1027. DOI: [10.1134/S0016793209070305](https://doi.org/10.1134/S0016793209070305).

Altandill D., Arrazola D., Blanch E. F-region vertical drift measurements at Ebro, Spain // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 691–698. DOI: [10.1016/j.asr.2006.11.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.023).

Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. 2014. V. 12, iss. 7. P. 508–525. DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120, iss. 10. P. 9023–9037. DOI: [10.1002/2015JA021629](https://doi.org/10.1002/2015JA021629).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Patrick A. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68, N 152. DOI: [10.1186/s40623-016-0526-x](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0526-x).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., et al. Global ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: multi-instrumental observations and modeling // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122, Iss. 11. P. 11716–11742. DOI: [10.1002/2017JA024174](https://doi.org/10.1002/2017JA024174).

Balan N., Yamamoto M., Liu J.Y., et al. New aspects of thermospheric and ionospheric storms revealed by CHAMP // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, N A07305. DOI: [10.1029/2010JA016399](https://doi.org/10.1029/2010JA016399).

Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88, iss. 3–4. P. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).

Burlaga L.P., Lepping B.P. The causes of recurrent geomagnetic storms // Planetary and Space Sci. 1977. V. 25, iss. 12. P. 1151–1160. DOI: [10.1016/0032-0633\(77\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90090-3).

Crowley G., Hackert C.L., Meier R.R., et al. Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 storm // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N A10S18. DOI: [10.1029/2005JA011518](https://doi.org/10.1029/2005JA011518).

Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Jin S., Sergeeva M.A. The second-order derivative of GPS carrier phase

as a promising means for ionospheric scintillation research // Pure and Applied Geophys. July 2019. P. 1–19. DOI: [10.1007/s00024-019-02281-6](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02281-6). 4555–4573,

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83, iss. 3–4. P. 191–198. DOI: [10.1007/s00190-008-0300-3](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3).

Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., et al. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, iss. A2. P. 2343–2353. DOI: [10.1029/95JA01614](https://doi.org/10.1029/95JA01614).

Juan J.M., Sanz J., Rovira-Garcia A., et al. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements // J. Space Weather and Space Climate. 2018. V. 8, N A14. DOI: [10.1051/swsc/2017044](https://doi.org/10.1051/swsc/2017044).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the  $f_oF_2$  and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // Ann. Geophysicae. 2017. V. 35, iss. 4. P. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere—ionosphere—plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 78–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).

Kurkin V.I., Polekh N.M., Pirog O.V., et al. The wind magnetic cloud of October, 18–26, 1995 effect on ionosphere over the Russian Asian region // Adv. Space Res. 2001. V. 27, iss. 8. P. 1381–1384. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00041-2).

Kurkin V.I., Polekh N.M., Zolotukhina N.A. The pattern of ionospheric disturbances caused by complex interplanetary structure on 19–22 December 2015 // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 179. P. 472–483. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.003).

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, iss. A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // Rev. Geophys. 2006. V. 44. RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, iss. 18. P. 2283–2286. DOI: [10.1029/97GL02273](https://doi.org/10.1029/97GL02273).

Piggott W.R., Rawer K. U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction. Boulder, Colorado: Report UAG-23, WDC-A for STP, NOAA, 1972. 135 p.

Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., et al. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia // Adv. Space Res. 2017. V. 60, iss. 11. P. 2464–2476. DOI: [10.1016/j.asr.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030).

Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, iss. 7. P. 1011–1021. DOI: [10.1134/S0016793209070299](https://doi.org/10.1134/S0016793209070299).

Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar // Radio Sci. 1997. V. 32, iss. 4. P. 1681–1694. DOI: [10.1029/97RS00841](https://doi.org/10.1029/97RS00841).

Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation // J. Atm. Terr. Phys. 1989. V. 51, iss. 11–12. P. 851–866. DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90002-0).

Sanz J., Juan J.M., Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing. Vol. 1: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk: ESA communications, 2013. 223 p.

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120, iss. 12. P. 10851–10863. DOI: [10.1002/2015JA021678](https://doi.org/10.1002/2015JA021678).

Wrenn G.L., Rodger A.S., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. 1. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects // *J. Atm. Terr. Phys.* 1987. V. 49, iss. 9. P. 901–913. DOI: [10.1016/0021-9169\(87\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(87)90004-3).

Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V., Kiselev A.V., et al. Tool for creating maps of GNSS total electron content variations // Proc. 2018 Symposium “Progress In Electromagnetics Research”. Toyama, Japan, 1–4 August 2018. P. 2417–2421. DOI: [10.23919/PIERS.2018.8597604](https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597604).

Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu. Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37, iss. 6. P. 1175–1181. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.130](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.130).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html> (дата обращения 20 января 2020).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 20 января 2020).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/77733/> (дата обращения 20 января 2020).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 20 января 2020).

URL: <http://simurg.iszf.irk.ru> (дата обращения 20 января 2020).

## REFERENCES

Afraimovich E.L., Beletskii A.B., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Mikhalev A.V., Ashkaliev Ya.F., et al. Simultaneous radiophysical and optical measurements of the ionospheric response during the large magnetic storm of April 6, 2000. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2002, vol. 42, iss. 3, pp. 366–375.

Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P., Rاتفsky K.G. Large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin according to the data of the GPS network and ionosondes. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, iss. 7, pp. 1213–1217. DOI: [10.1016/j.asr.2007.11.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.11.023).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriluk N.S., Ishin A.B., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *J. Space Weather and Space Climate*. 2013, vol. 3, no. A27. DOI: [10.1051/swsc/2013049](https://doi.org/10.1051/swsc/2013049).

Alsatkin S.S., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Analyzing the characteristics of phase-shift keyed signals applied to the measurement of an electron concentration profile using the radiophysical model of the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, vol. 49, iss. 7, pp. 1022–1027. DOI: [10.1134/S0016793209070305](https://doi.org/10.1134/S0016793209070305).

Altandill D., Arrazola D., Blanch E. F-region vertical drift measurements at Ebro, Spain *Adv. Space Res.* 2007, vol. 39, pp. 691–698. DOI: [10.1016/j.asr.2006.11.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.023).

Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. *Space Weather*. 2014, vol. 12, iss. 7, pp. 508–525. DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick’s Day storm: A global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 10, pp. 9023–9037. DOI: [10.1002/2015JA021629](https://doi.org/10.1002/2015JA021629).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Patrick A. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation. *Earth, Planets and Space*. 2016, vol. 68, no. 152. DOI: [10.1186/s40623-016-0526-x](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0526-x).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., Doornbos E., van den IJssel J. Global ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, iss. 11, pp. 11716–11742. DOI: [10.1002/2017JA024174](https://doi.org/10.1002/2017JA024174).

Balan N., Yamamoto M., Liu J.Y., Liu H., Lühr H. New aspects of thermospheric and ionospheric storms revealed by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, no. A07305. DOI: [10.1029/2010JA016399](https://doi.org/10.1029/2010JA016399).

Blagoveshchenskii D.V. Effect of magnetic storms (substorms) on HF propagation: A review. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013, vol. 53, iss. 4, pp. 409–423. DOI: [10.1134/S0016793213040038](https://doi.org/10.1134/S0016793213040038).

Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. Fizika ionosfery [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p. (In Russian).

Buonsanto M.J. Ionospheric storms – A review. *Space Science Rev.* 1999, vol. 88, iss. 3, pp. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).

Burlaga I.P., Lepping B.P. The causes of recurrent geomagnetic storms. *Planetary and Space Sci.* 1977, vol. 25, iss. 12, pp. 1151–1160. DOI: [10.1016/0032-0633\(77\)90090-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90090-3).

Crowley G., Hackert C.L., Meier R.R., Strickland D.J., Paxton L.J., Pi X., Mannucci A., et al. Global thermospheric response to onset of 20 November 2003 storm. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, no. A10S18. DOI: [10.1029/2005JA011518](https://doi.org/10.1029/2005JA011518).

Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 52, iss. 3, pp. 343–366. DOI: [10.1016/j.asr.2013.04.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019).

Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V. *Mekhanizmy vozdeystviya neregulyarnykh geofizicheskikh faktorov na funktsionirovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh system* [Mechanisms of Impact of Irregular Geophysical Factors on Operation of Radio Positioning Satellite Systems]. Irkutsk, Izdatelstvo IGU, 2014. 349 p. (In Russian).

Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V., Jin S., Sergeeva M.A. The second-order derivative of GPS carrier phase as a promising means for ionospheric scintillation research. *Pure and Applied Geophys.* July 2019, pp. 1–19. DOI: [10.1007/s00024-019-02281-6](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02281-6).

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geodesy*. 2009, vol. 83, iss. 3–4, pp. 191–198. DOI: [10.1007/s00190-008-0300-3](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3).

Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Rishbeth H., Moffett R.J., Quegan S. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, iss. A2, pp. 2343–2353. DOI: [10.1029/95JA01614](https://doi.org/10.1029/95JA01614).

Juan J.M., Sanz J., Rovira-Garcia A., González-Casado G., Ibáñez D., Perez R.O. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements. *J. Space Weather and Space Climate*. 2018, vol. 8, no. A14. DOI: [10.1051/swsc/2017044](https://doi.org/10.1051/swsc/2017044).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Rاتفsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Yu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011. *Ann. Geophysicae*. 2017, vol. 35, iss. 4, pp. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., et al. Disturbances of the thermosphere—ionosphere—plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick’s Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 78–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).

Kotova D.S., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharov V.E. Influence of geomagnetic storms of September 26–30, 2011, on the ionosphere and HF radiowave propagation. II. Radiowave propagation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, iss. 3, pp. 288–300. DOI: [10.1134/S0016793217030100](https://doi.org/10.1134/S0016793217030100).

- Kurkin V.I., Polekh N.M., Pirog O.M., Chistyakova L.V., Zherebtsov G.A. The solar wind magnetic cloud of October, 18–20, 1995 effect on ionosphere of the Russian Asian region. *Adv. Space Res.* 2001, vol. 27, iss. 8, pp. 1381–1384. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00041-2).
- Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M. Cyclic and seasonal variations in the ionospheric effects of geomagnetic storms. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2004, vol. 44, iss. 5, pp. 583–591.
- Kurkin V.I., Polekh N.M., Zolotukhina N.A. The pattern of ionospheric disturbances caused by complex interplanetary structure on 19–22 December 2015. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 179, pp. 472–483. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.003).
- Leonovich L.A., Mikhalev A.V., Leonovich V.A. Manifestation of geomagnetic disturbances in mid-latitude upper atmosphere glow. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2012, iss. 20, pp. 109–115. (In Russian).
- Leonovich L.A., Mikhalev A.V., Tashchilin A.V., Rahmatulin R.A., Leonovich V.A., Pashinin A.Yu. The response of mid-latitude upper atmospheric parameters to January 21, 2005 geomagnetic storm as deduced from optical, magnetic and radiophysical measurements. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2013, vol. 26, iss. 1, pp. 75–80. (In Russian).
- Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, iss. A7, pp. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006, vol. 44, RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).
- Mikhalev A.V. Midlatitude airglows in East Siberia in 1991–2012. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2013, iss. 24, pp. 78–83. (In Russian).
- Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network. *Geophysical Res. Lett.* 1997, vol. 24, iss. 18, pp. 2283–2286. DOI: [10.1029/97GL02273](https://doi.org/10.1029/97GL02273).
- Piggott W.R., Rawer K. U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction. 2<sup>nd</sup> ed. Report UAG-23, WDC-A for STP, NOAA, Boulder, Colorado, 1972. 135 p.
- Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zherebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Adv. Space Res.* 2017, vol. 60, iss. 11, pp. 2464–2476. DOI: [10.1016/j.asr.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030).
- Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Lepetaev V.V., Shpynev B.G. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2009, vol. 49, iss. 7, pp. 1011–1021. DOI: [10.1134/S0016793209070299](https://doi.org/10.1134/S0016793209070299).
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., Korenkova N.A., Kotova D.S. After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 26–32. DOI: [10.12737/stp-44201804](https://doi.org/10.12737/stp-44201804).
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I.A., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, iss. 4, pp. 1681–1694. DOI: [10.1029/97RS00841](https://doi.org/10.1029/97RS00841).
- Rodger A.S., Wrenn G.L., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation. *J. Atm. Terr. Phys.* 1989, vol. 51, iss. 11–12, pp. 851–866. DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90002-0).
- Romanova E.B., Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Polekh N.M., Shi J., Wang X., Wang G. Comparing the ionosphere F2-layer response to geomagnetic storms at mid and low latitudes. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2013, iss. 22, pp. 27–30. (In Russian).
- Sanz J., Juan J.M., Hernández-Pajares M. GNSS data processing. Vol. 1: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk, ESA communications, 2013. 223 p.
- Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 12, pp. 10851–10863. DOI: [10.1002/2015JA021678](https://doi.org/10.1002/2015JA021678).
- Tashchilin A.V., Leonovich L.A. Modeling nightglow in atomic oxygen red and green lines under moderate disturbed geomagnetic conditions at midlatitudes. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 94–106. DOI: [10.12737/24276](https://doi.org/10.12737/24276).
- Tashlykov V.P., Medvedev A.V., Vasilyev R.V. Backscatter signal model for Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 2, pp. 24–32. DOI: [10.12737/stp-42201805](https://doi.org/10.12737/stp-42201805).
- Wrenn G.L., Rodger A.S., Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. 1. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. *J. Atm. Terr. Phys.* 1987, vol. 49, iss. 9, pp. 901–913. DOI: [10.1016/0021-9169\(87\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(87)90004-3).
- Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V., Kiselev A.V., Edemskiy I.K., Syrovatsky S.V., Shabalin A.S., Vesnin A.M. Tool for creating maps of GNSS total electron content variations. *Proc. 2018 Symposium "Progress In Electromagnetics Research"*. Toyama, Japan, 1–4 August 2018, pp. 2417–2421. DOI: [10.23919/PIERS.2018.8597604](https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597604).
- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu. Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, iss. 6, pp. 1175–1181. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.130](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.130).
- Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., Novosov V.E., Potekhin A.P., Shpynev B.G. The Irkutsk Incoherent Scattering Radar. *J. Communications Technology and Electronics.* 2002, vol. 47, iss. 11, pp. 1222–1228.
- Zolotukhina N.A., Kurkin V.I., Polekh N.M. Ionospheric disturbances over East Asia during intense December magnetic storms of 2006 and 2015: similarities and differences. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 3, pp. 28–42. DOI: [10.12737/stp-43201805](https://doi.org/10.12737/stp-43201805).
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html> (accessed January 20, 2020).
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed January 20, 2020).
- URL: <http://ckp-rf.ru/usu/77733/> (accessed January 20, 2020).
- URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (accessed January 20, 2020).
- URL: <http://simurg.iszf.irk.ru> (accessed January 20, 2020).

#### Как цитировать эту статью

Рубцов А.В., Малецкий Б.М., Данильчук Е.И., Смотрова Е.Е., Шелков А.Д., Ясюкевич А.С. Возмущения ионосферы над Восточной Сибирью во время геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 1. С. 75–85. DOI: [10.12737/szf-61202007](https://doi.org/10.12737/szf-61202007).