

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ В ПЕРИОДЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ: ВИЗУАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ SAR-ДУГИ В ИРКУТСКЕ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ КЭРРИНГТОНА 1859 Г.

AURORAS DURING EXTREME GEOMAGNETIC STORMS: VISUAL OBSERVATIONS OF THE SAR ARC IN IRKUTSK DURING THE 1859 CARRINGTON EVENT

А.В. Михалев 

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

А.Б. Белецкий

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@mail.iszf.irk.ru

A.V. Mikhalev

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

A.B. Beletsky

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

Аннотация. В работе анализируется описание в летописях полярного сияния 2 сентября 1859 г., наблюдавшегося в Иркутске в период события Кэррингтона. Описание красной дуги очевидцем, анализ геомагнитной обстановки, публикации о визуальных наблюдениях различных форм полярных сияний на средних и низких широтах в этот период, современные инструментальные наблюдения SAR-дуг на широте Иркутска позволили допустить, что красная дуга, описанная в летописях, является SAR-дугой — одним из типов сияний в субавроральных и средних широтах, наблюдавшихся во время геомагнитных бурь. Было установлено, что в Иркутске SAR-дуга наблюдалась на фазе восстановления магнитной супербури. Интенсивность SAR-дуги была оценена как ~10–20 кРл. Проекция плазмопаузы на ионосферу 2 сентября 1859 г. около 12 UT приходилась на широту Иркутска. Можно допустить, что описание полярного сияния 2 сентября 1859 г. в Иркутске является первым предметным описанием SAR-дуги, за век до ее открытия как явления в 1958 г.

Ключевые слова: событие Кэррингтона, полярные сияния, SAR-дуга, среднеширотные сияния.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые глобальные климатические изменения, а также возможная роль вариаций солнечной активности в них обусловливают огромный интерес к экстремальным природным событиям прошлых веков (см., например, [Kataoka et al., 2019; Knipp et al., 2021; Berrilli, Giovannelli, 2022]). Детальное рассмотрение таких событий с учетом современного понимания физических процессов и явлений может быть полезным для их корректной интерпретации. Это в полной мере относится к экстремальным магнитным бурям и выдающимся сияниям (*great aurora*).

В связи с этим представляет интерес описание очевидцем среднеширотного полярного сияния, наблюдавшегося в Иркутске 21 августа 1859 г. (по старому стилю) [Чернигов, 2003]: «Около 7 часов вечера заметно было на северо-западе красное светлое облако,

Abstract. The paper analyzes the description in chronicles of the September 2, 1859 auroras observed in Irkutsk during the Carrington event. The description of the red arc by an eyewitness, the analysis of geomagnetic conditions, publications on visual observations of auroras of various forms at middle and low latitudes during this period, modern instrumental observations of SAR arcs at the latitude of Irkutsk have allowed us to assume that the red arc described in the chronicles is a SAR arc — one of the auroral types at subauroral and middle latitudes observed during geomagnetic storms. We have established that in Irkutsk the SAR arc was observed during the recovery phase of the magnetic superstorm. The intensity of the SAR arc was estimated at ~10–20 kR. The projection of the plasmapause onto the ionosphere on September 2, 1859 at ~12 UT was at the latitude of Irkutsk. We can assume that the description of the aurora borealis on September 2, 1859 in Irkutsk is the first objective description of the SAR arc, a century before its discovery as a phenomenon in 1958.

Keywords: carrington event, auroras, SAR arc, mid-latitude airglow.

а потом образовалась красная дуга, проходящая через зенит от северо-запада к юго-востоку. Около 8 часов появился на севере отбел (бледный белый свет (*Примеч. ред.*)) — предвестник северного сияния. Он из белого обратился в ярко-серебристый, и вскоре на нем показались расходящиеся лучи красного и белого цветов. Арки, из которой обычно выходят расходящиеся колонны, не было видно. Она была или под горизонтом, или закрывалась облаками. С появлением колонн красная дуга приняла другое направление: один ее конец был на западе, а другой — на востоке, вершина проходила через зенит. Она имела везде одинаковую ширину, как радуга, только красного цвета; в 10 часов 15 минут северное сияние окончилось, и с ним вместе исчезла дуга. В Иркутске изредка бывали видны северные сияния, но, чтобы это явление сопровождалось красною дугою, проходящую через зенит, этого не было замечено до этого года».

Специалистам, занимающимся полярными сияниями, с высокой долей вероятности ясно, что описанная красная дуга может соответствовать такому явлению, как SAR-дуга — тип сияний в субавроральных и средних широтах, открытый Д. Барбье в 1958 г. [Barbier, 1959]. SAR-дуги — относительно редкое оптическое явление, наблюдаемое в субавроральных широтах во время геомагнитных бурь. Основное излучение происходит в запрещенных линиях дуплета атомарного кислорода [OI] 630.0 и 636.4 нм с характерной интенсивностью от сотен рэлей до нескольких килорэлей. SAR-дуги коррелируют с геомагнитной активностью и наблюдаются преимущественно на фазе восстановления магнитных бурь [Kozyra et al., 1997]. В настоящей работе проводится анализ описанного очевидцем полярного сияния и сопутствующих этому явлению геофизических условий с целью его интерпретации как SAR-дуги.

ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ ВО ВРЕМЯ ПОЛЯРНОГО СИЯНИЯ В ИРКУТСКЕ В 1859 Г.

Обзор геомагнитных бурь августа–сентября 1859 г. приводит к событию Кэррингтона — комплексу экстремальных явлений на Солнце и Земле, включающему мощнейшую магнитную бурю за всю историю наблюдений. Геомагнитная буря началась 2 сентября 1859 г. по григорианскому календарю, к которому Россия присоединилась только в 1918 г. Разница между старым и новым стилем на тот период составляла 12 дней, таким образом, 21 августа 1859 г. по старому стилю будет соответствовать 2 сентября 1859 г. Далее при обсуждении полярного сияния 1859 г. в Иркутске будет использоваться новый стиль.

Геомагнитная буря 1859 г. на самом деле состояла из двух последовательных магнитных бурь 28 августа и 2 сентября. Магнитная буря 2 сентября была вызвана солнечной вспышкой белого света Кэррингтона—Ходжсона, произошедшей 1 сентября [Green et al., 2006].

Наблюдаемые в эти дни полярные сияния в максимуме своего развития описывались как кровавые или темно-малиново-красные, которые были настолько яркими, что «можно было читать газету». Красные полярные сияния были отнесены к типу «А» и длились несколько часов, достигнув экстремально низких геомагнитных широт 28–29 августа ($\sim 25^\circ$) и 2–3 сентября ($\sim 18^\circ$). Полярные сияния всех типов и окрасок наблюдались ниже 50° широты в течение ~ 24 ч 28–29 августа и ~ 42 ч 2–3 сентября [Green, Boardsen, 2006].

Минимальный Dst -индекс для этой бури оценивается специалистами от -900 до -1760 нТл [Cliver, Dietrich, 2013], что является максимальным отрицательным отклонением за всю историю магнитных наблюдений. Одним из возможных источников такого магнитного возмущения может являться усиленный кольцевой ток [Tsurutani et al., 2003]. Продолжительность главной фазы магнитной бури составила ~ 1.5 ч, положение плазмопаузы на главной фазе, по оценкам [Lakhina, Tsurutani, 2016], соответствовало $L=1.3$.

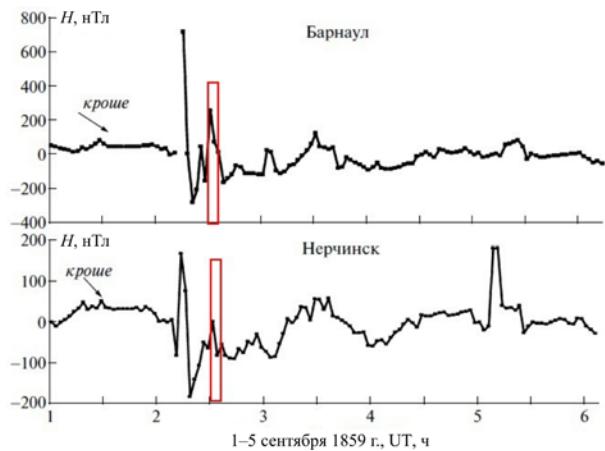


Рис. 1. Часовые значения отклонений от среднего H -компоненты магнитного поля 1–5 сентября 1859 г. для ст. «Барнаул» и «Нерчинск» [Тясто и др., 2009] и временной интервал наблюдения полярного сияния в Иркутске [Чернигов, 2003] (выделен красным прямоугольником)

В работе [Тясто и др., 2009] на основе архивных магнитных данных российской сети наблюдений показано, что 2 сентября 1859 г. между 04 и 06 UT на всех станциях началось очень сильное кратковременное магнитное возмущение (длительностью $t=1\text{--}2$ ч). В промежутке $\sim 4:30\text{--}6:30$ UT часовые значения H -компоненты магнитного поля резко увеличиваются и выходят за шкалу измерений на станциях в Санкт-Петербурге, Екатеринбурге и Барнауле. Исключение составляет станция в Нерчинске [Тясто и др., 2009]. Вероятно, этот интервал времени соответствует началу главной фазы магнитной бури.

На рис. 1 приведен фрагмент рисунка из работы [Тясто и др., 2009] с часовыми значениями отклонений от среднего H -компоненты магнитного поля 1–5 сентября 1859 г. для ст. «Барнаул» (53° N, 82° E) и «Нерчинск» (51° N, 117° E). Красным прямоугольником показано время наблюдения полярного сияния в Иркутске (52° N, 104° E, L -оболочки ~ 2). Иркутск по долготе находится посередине между Барнаулом и Нерчинском на близких с ними широтах. Указан также интервал времени наблюдения кроме, связанный с большим потоком ионизующего электромагнитного излучения во время Кэррингтоновской солнечной вспышки (между 11 и 12 UT 1 сентября 1859 г.). По мнению Тясто и др. [2009], характер вариаций H -компоненты 2–3 сентября свидетельствует о том, что во время этой бури на средних и высоких широтах наблюдалось очень большое усиление ионосферного и/или магнитосферного тока.

Приведенное выше описание полярного сияния 1859 г. в Иркутске и соответствующие сиянию геомагнитные и ионосферные возмущения могут совпадать с геофизическими условиями и описаниями характеристик и динамики SAR-дуг, которые в последние годы наблюдаются с помощью высокочувствительной аппаратуры [Михалев и др., 2018] в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E). На рис. 2 приведены примеры регистрации SAR-дуг в красной линии кислорода 630.0 нм (длина волны соответствует красному диапазону спектра) камерами всего неба в ГФО, расположенной на 100 км юго-западнее Иркутска. SAR-дуга присутствует на изображениях в виде яркой полосы, протя-

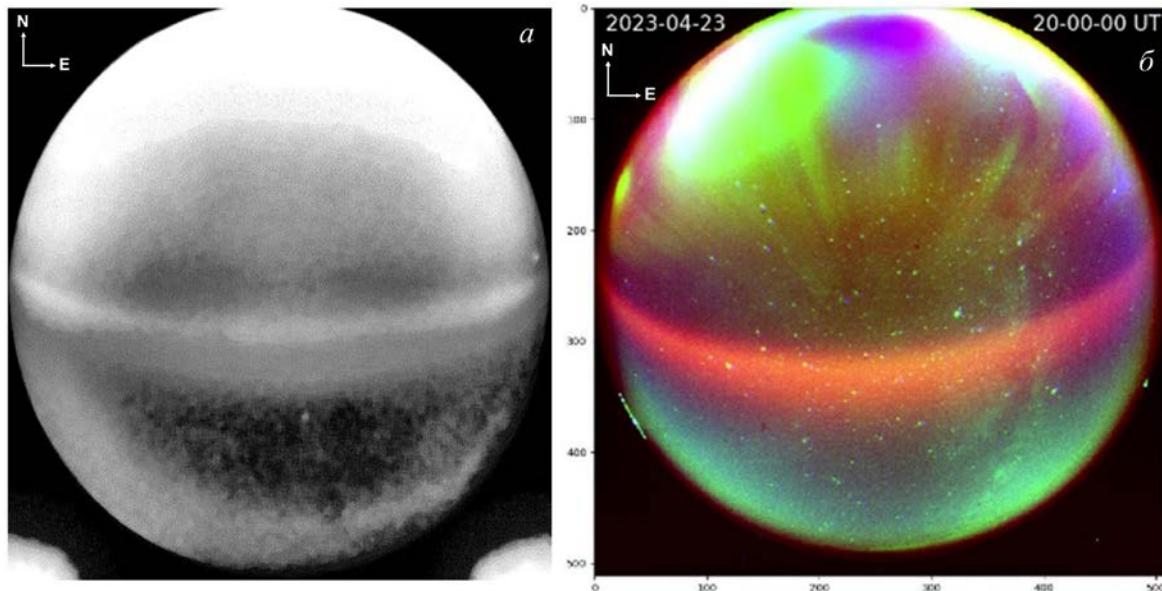


Рис. 2. Изображения SAR-дуг, наблюдавшихся в ГФО ИСЗФ СО РАН, в течение двух магнитных бурь 17 марта 2015 г. (а) и 23 апреля 2023 г. (б)

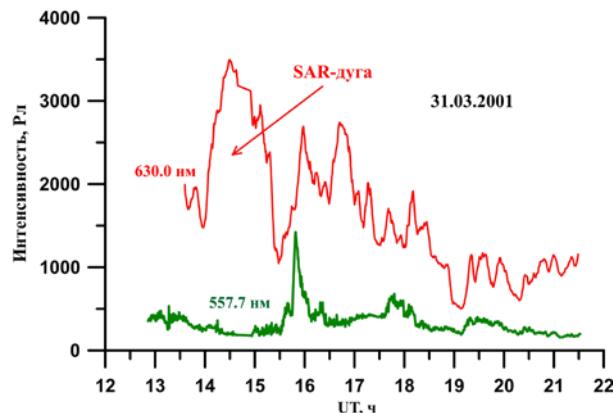


Рис. 3. Вариации интенсивности эмиссий [OI] 557.7 и 630.0 нм 31 марта 2001 г. на фазе восстановления большой магнитной бури. Данные получены в ГФО ИСЗФ СО РАН

нувшейся через весь небосвод с запада на восток вблизи зенита, что соответствует описанию очевидцем сияния 2 сентября 1859 г.

На рис. 3 приводятся данные наблюдения SAR-дуги в эмиссии [OI] 630.0 нм, зарегистрированной зенитным фотометром на фазе восстановления большой геомагнитной бури 31 марта 2001 г. [Горелый и др., 2002; Дегтярев и др., 2003]. Формирование SAR-дуги во время геомагнитной бури 2001 г. в геофизических условиях, подобных условиям развития бури 1859 г., позволяет предполагать, что дуга 1859 г. могла наблюдаваться на фазе восстановления магнитной бури. В пользу этого предположения говорит продолжительность главной фазы магнитной бури с 04 до 06 UT (см. выше) и время наблюдения SAR-дуги в Иркутске с 12 до 15 UT.

Геомагнитные условия 1–3 сентября 1859 г., соответствующие большой мировой геомагнитной буре [Тясто и др., 2009], наблюдения различных форм полярных сияний на средних и низких широтах [Green, Boardsen, 2006], описание анализируемого

полярного сияния в архивных источниках как красной дуги через весь небосвод, время и геомагнитная широта его наблюдения, соответствующая L -оболочке ~ 2 , — все это позволяет предположить, что 2 сентября 1859 г. в Иркутске наблюдалась SAR-дуга на фазе восстановления большой магнитной бури. Заметим, что в работе [Hayakawa et al., 2018] отдельное красное сияние, наблюдавшееся 1 сентября 1859 г. в низких широтах ($17\text{--}18^\circ$ N) Западного полушария, также интерпретируется как SAR-дуга. Одним из обоснований этого вывода является неподвижность красного сияния в течение $\sim 4\text{--}5$ ч.

ШИРОТНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ SAR-ДУГ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ

Широтные распределения частоты наблюдения SAR-дуг во время геомагнитных бурь в анализируемом долготном секторе в большой степени обусловлены состоянием кольцевого тока Земли и, соответственно, вариациями Dst -индекса [Иевенко, Алексеев, 2004]. SAR-дуга является проекцией плазмопаузы на высотах ионосферы и отражает магнитосферно-ионосферные процессы. Излучение 630.0 нм SAR-дуги обусловлено потоком тепловой энергии из магнитосферы в термосферу вдоль магнитного поля Земли, который возникает при взаимодействии усиленного во время магнитной бури кольцевого тока с плазмосферой Земли в области плазмопаузы [Baumgardner et al., 2008], поэтому многие авторы связывают SAR-дуги с магнитосферной проекцией плазмопаузы на F2-область ионосферы [Rassoul et al., 1993].

Как уже отмечалось выше, положение плазмопаузы во время главной фазы магнитной бури 2–3 сентября 1859 г. оценивается как $L=1.3$ [Lakhina, Tsurutani, 2016]. Иркутск и ГФО имеют близкие исправленные геомагнитные широты $\sim 47^\circ$, соответствующие L -оболочке ~ 2 . Поэтому есть основание считать, что маг-

нитосферная проекция плазмопаузы во время магнитной бури 2–3 сентября 1859 г. могла находиться в зените над Иркутском.

В свою очередь положение плазмопаузы в магнитосфере Земли (L -оболочка) во время геомагнитных бурь определяется величиной кольцевого тока (Dst -индексом). Зная зависимость L -оболочки от Dst -индекса во время больших геомагнитных бурь [Хорошева, 2007], можно оценить значение Dst -индекса для L -оболочки плазмопаузы. Для рассматриваемого момента времени наблюдения SAR-дуги в зените над Иркутском ($L \sim 2$) в 1859 г. значение Dst -индекса находится в диапазоне от –300 до –400 нТл. К сожалению, из-за эффекта насыщения зависимости L -оболочки от Dst -индекса при $L \leq 2$ точность таких оценок недостаточно высока. С другой стороны, имеются более поздние зенитные наблюдения SAR-дуги 31 марта 2001 г. вблизи Иркутска на фазе восстановления магнитной бури при $Dst \sim -300$ нТл [Дегтярев и др., 2003]. Эта SAR-дуга наблюдалась одновременно в двух долготно-разнесенных зонах — южнее Москвы на ст. «Михнево» ИДГ РАН и в ГФО ИСЗФ СО РАН, с. Торы [Горелый и др., 2002]. Интенсивности SAR-дуг составляли 3–4 кРл на ст. «Михнево» и 2–3 кРл вблизи Иркутска (ГФО). Это делает более надежными оценки Dst -индекса (<–300 нТл) во время наблюдения SAR-дуги в Иркутске в 1859 г.

ИНТЕНСИВНОСТИ SAR-ДУГ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ

В отличие от обычных полярных сияний, наблюдавшихся во время геомагнитных бурь, SAR-дуги в большинстве случаев имеют субвизуальные интенсивности (ниже порога чувствительности глаза в красной области спектра ~ 10 кРл). И лишь в очень редких случаях SAR-дуги имеют уровень яркости, доступный для наблюдения невооруженным глазом [Лобзин, Павлов, 1998; Baumgardner et al., 2008]. Следует подчеркнуть некоторую противоречивость в вопросе абсолютных интенсивностей SAR-дуг.

В работе [Hoch, 1973] отмечается, что в период Международного геофизического года 1957–1958 гг. типичное значение интенсивности SAR-дуг составляло ~ 1 кРл при максимальном значении 10 кРл, зарегистрированном в 1958 г. В работе [Baumgardner et al., 2008] детально анализируются условия возникновения SAR-дуги с интенсивностью 13 кРл 29 октября 1991 г. И наконец, есть сообщение о SAR-дуге с интенсивностью 125 кРл [Roach, Roach, 1963]. Rees и Akasofu [1963], используя данные наблюдений в период высокой солнечной активности с 1956 по 1960 г., обнаружили положительные корреляции интенсивности ярких SAR-дуг (300 Рл – 13 кРл) с геомагнитными индексами Dst и K_p . При этом ярким SAR-дугам с интенсивностями 11–13 кРл соответствовали значения Dst -индекса $\sim -210 \div -220$ нТл. Линейная аппроксимация зависимости интенсивности SAR-дуги от Dst -индекса по данным, приведенным в [Rees, Akasofu, 1963], дает интенсивность SAR-дуги 20 кРл и более при Dst -индексе ~ -300 нТл.

Учитывая достаточно детальное описание очевидцем красной дуги 1859 г., можно предполагать, что ее интенсивность превышала порог чувствительности глаза в красной области спектра ~ 10 кРл. Согласно работе [Rees, Akasofu, 1963], при $Dst \sim -300$ нТл и менее максимальная интенсивность SAR-дуги может составлять 20 кРл и более. В обоих случаях наблюдавшаяся в Иркутске в 1859 г. красная дуга может быть отнесена к интенсивным SAR-дугам.

Уместно будет упомянуть о результатах работы [Zhang, 1985], в которой сообщается о наблюдениях полярных сияний в Корее в 1507–1747 гг. нашей эры. На основании описанных характеристик сияний и нескольких статистических анализов автор предполагает, что некоторые из них не были обычными полярными сияниями, а, скорее всего, являлись SAR-дугами.

Как отмечалось выше, магнитная бури 2–3 сентября 1859 г. характеризуется не только рекордным значением Dst -индекса, но и необычными оптическими проявлениями [Green et al., 2006]. В этом случае SAR-дуга, наблюдавшаяся в 1859 г. в Иркутске, может расширить список типов сияний, наблюдавшихся во время этой экстремальной геомагнитной бури, и дополнить список самых интенсивных SAR-дуг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ геомагнитной обстановки 1–3 сентября 1859 г. в период события Кэррингтона, визуальные наблюдения различных форм полярных сияний на средних и низких широтах в эти дни, а также современные представления о морфологии и механизмах формирования SAR-дуг и сопоставление с инструментальными наблюдениями SAR-дуг вблизи Иркутска позволяют допустить, что красная дуга, визуально наблюдавшаяся 2 сентября 1859 г. в Иркутске и описанная в летописях [Чернигов, 2003], является SAR-дугой.

В этом случае наблюдавшаяся в Иркутске 2 сентября 1859 г. SAR-дуга может дополнить список самых интенсивных SAR-дуг. Интенсивность SAR-дуги 1859 г., описанной в иркутских летописях, может быть оценена в $\sim 10 \div 20$ кРл.

На основе архивных данных российской сети магнитных наблюдений определено, что SAR-дуга наблюдалась на фазе восстановления магнитной супербури 2 сентября 1859 г.

Проекция плазмопаузы на ионосферу 2 сентября 1859 г. около 12 UT находилась на широте Иркутска.

Величина Dst -индекса около 12 UT 2 сентября 1859 г. может быть оценена от –300 до –400 нТл.

Можно допустить, что на текущий момент приведенное выше описание полярного сияния 2 сентября 1859 г. в Иркутске является первым предметным описанием SAR-дуги, за век до ее открытия как явления [Barbier, 1958]. Несомненно, что человечество не раз наблюдало это явление в средних широтах в предшествующие века.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. В работе были использованы данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горелый К.И., Карабиев В.Д., Иевенко И.Б. и др. Одновременные оптические наблюдения большой магнитной бури 31 марта 2001 г. в Москве, Восточной Сибири и Якутии. *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 2 (115). С. 265–266 // Gorelyi K.I., Karachiev V.D., Ievenko I.B., et al. Simultaneous optical observations of the strong magnetic storm on March 31, 2001 in Moscow, Eastern Siberia, and Yakutia. *Solar-Terrestrial Physics*. 2002. Vol. 2 (115). P. 265–266. (In Russian).
- Дегтярев В.И., Михалев А.В., Jiyao Xu. Вариации свечения ночных неба в Восточной Сибири в период магнитной бури 31 марта – 4 апреля 2001 г. *Оптика атмосферы и океана*. 2003. Т. 16, № 5-6. С. 552–556.
- Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. Т. 44, № 5. С. 643–654.
- Лобзин В.В., Павлов А.В. Связь интенсивности свечения субавроральных красных дуг с солнечной и геомагнитной активностью. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1998. Т. 38, № 4. С. 49–61.
- Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-44201806](https://doi.org/10.12737/szf-44201806) // Mikhalev A.V., Beletsky A.B., Vasilyev R.V., et al. Spectral and photometric characteristics of mid-latitude auroras during the magnetic storm of March 17, 2015. *Solar-Terrestrial Physics*. 2018. Vol. 4, no. 4. P. 42–47. DOI: [10.12737/stp-44201806](https://doi.org/10.12737/stp-44201806).
- Тясто М.И., Птицына Н.Г., Веселовский И.С., Яковчук О.С. Экстремально сильная магнитная буря 2–3 сентября 1859 г. по архивным магнитным данным российской сети наблюдений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009. Т. 49, № 2. С. 163–173.
- Хорошева О.В. Связь геомагнитных возмущений с динамикой магнитосфера и параметрами межпланетной среды. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47, № 5. С. 579–583.
- Черников А.К. *Иркутские повествования. 1661–1917 годы:* в 2 т. / Автор-составитель А.К. Черников. Иркутск: Оттиск, 2003. Т. 2. С. 188.
- Barbier D. Recherches sur la raie 630.0 de la luminescence atmosphérique nocturne. *Ann. Geophys.* 1959. Vol. 15, no. 2. P. 179–217.
- Baumgardner J., Wrotten J., Semeter J., et al. A very bright SAR arc: implications for extreme magnetosphere-ionosphere coupling. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 25 (12). P. 2593–2608.
- Berrilli F., Giovannelli L. The great aurora of 4 February 1872 observed by Angelo Secchi in Rome. *J. Space Weather Space Climate*. 2022. Vol. 12, 3. DOI: [10.48550/arXiv.2201.01171](https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.01171).
- Cliver E.W., Dietrich W.F. The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *J. Space Weather Space Climate*. 2013. Vol. 3, no. A31. DOI: [10.1051/swsc/2013053](https://doi.org/10.1051/swsc/2013053).
- Green J.L., Boardsen S. Duration and extent of the great auroral storm of 1859. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 38. P. 130–135.
- Green J.L., Boardsen S., Odenwald S., et al. Eyewitness reports of the great auroral storm of 1859. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 38. P. 145–154. DOI: [10.1016/j.asr.2005.12.021](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.12.021).
- Hayakawa H., Ebihara Y., Hand D.P., et al. Low-latitude aurorae during the extreme space weather events in 1859. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 869, no. 1. DOI: [10.3847/1538-4357/aae47c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae47c).
- Hoch R.J. Stable auroral red arcs. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1973. Vol. 11. P. 935–949.
- Kataoka R., Uchino S., Fujiwara Y., et al. Fan-shaped aurora as seen from Japan during a great magnetic storm on February 11, 1958. *J. Space Weather Space Climate*. 2019. Vol. 9, no. A16. DOI: [10.1051/swsc/2019013](https://doi.org/10.1051/swsc/2019013).
- Knipp D.J., Bernstein V., Wahl K., Hayakawa H. Timelines as a tool for learning about space weather storms. *J. Space Weather Space Climate*. 2021. Vol. 11, no. 29. DOI: [10.1051/swsc/2021011](https://doi.org/10.1051/swsc/2021011).
- Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs. *Rev. Geophys.* 1997. Vol. 35, iss. 2. P. 155–190. DOI: [10.1029/96RG03194](https://doi.org/10.1029/96RG03194).
- Lakhina G.S., Tsurutani B.T. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geosci. Lett.* 2016. Vol. 3, iss. 1. DOI: [10.1186/s40562-016-0037-4](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0037-4).
- Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae. *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98, no. A5. P. 7695–7709.
- Rees M.H., Akasofu S.I. On the association between subvisual red arcs and the *Dst* (*H*) decrease. *Planet. Space Sci.* 1963. Vol. 11, no. 2. P. 105–107.
- Roach F.E., Roach J.R. Stable 6300 Å auroral arcs in mid-latitudes. *Planet. Space Sci.* 1963. Vol. 11, iss. 5. P. 523–545. DOI: [10.1016/0032-0633\(63\)90076-x](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90076-x).
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Lakhina G.S., Alex S. The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2003. Vol. 108, no. A7. DOI: [10.1029/2002JA009504](https://doi.org/10.1029/2002JA009504).
- Zhang Z. Korean auroral records of the period AD 1507–1747 and the SAR arcs. *J. Brit. Astron. Assoc.* 1985. Vol. 95, iss. 5. P. 205–210.
- URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 8 ноября 2024 г.).
- Как цитировать эту статью:*
- Михалев А.В., Белецкий А.Б. Полярные сияния в периоды экстремальных геомагнитных бурь: визуальные наблюдения SAR-дуги в Иркутске во время события Кэррингтона 1859 года. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 50–54. DOI: [10.12737/szf-111202505](https://doi.org/10.12737/szf-111202505).