

Первые визуальные наблюдения SAR-дуги в Иркутске во время события Кэррингтона 1859?

Михалев А.В., Белецкий А.Б.

mikhalev@iszf.irk.ru, beletsky@iszf.irk.ru

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Введение

В связи с наблюдаемыми существенными глобальными климатическими изменениями, возможной роли вариации солнечной активности в них, интерес к экстремальным природным событиям в прошлые века огромен (см., например, [Berrilli and Giovannelli, 2022]). Детальное рассмотрение таких событий, их систематизация учетом современного понимания физических процессов и явлений может быть полезным для их корректной интерпретации. Это в полной мере относится к экстремальным магнитным бурям и наблюдаемым знаменитым сияниям («great aurora») в прошлые века.

В работе приводится анализ описания очевидца полярного сияния 1859 года, наблюдаемого в средних широтах в г. Иркутске.

Также приведены примеры возмущений, обусловленных геомагнитной активностью, зарегистрированных оптическими инструментами Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН.

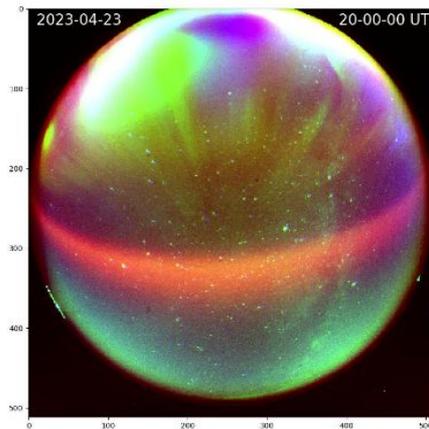
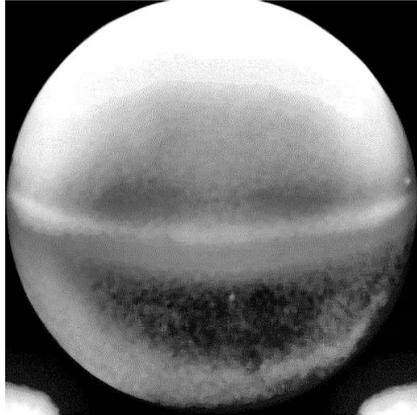
Полярное сияние 1859 года

Вот некоторые выдержки из описания в иркутских летописях очевидцем полярного сияния, произошедшего в г. Иркутске 21 августа 1859 г (по старому стилю) [Чернигов, 2003]:

«Около 7 часов вечера заметно было на северо-западе красное светлое облако, а потом образовалась красная дуга, проходящая через зенит от северо-запада к юго-востоку. Около 8 часов появился на севере отбел — предвестник северного сияния.... С появлением колонн красная дуга приняла другое направление: один её 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, проходящею через зенит, этого не было замечено до этого года».

Полярное сияние 1859 года

С высокой долей вероятности речь идет об явлении SAR-дуги (одном из типов сияний). Приведенное выше описание полярного сияния в большинстве случаев может быть применимо и к описаниям наблюдений в последние годы этого явления и его динамики, зарегистрированных с помощью высокочувствительной аппаратуры в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, расположенной в 130 км от г. Иркутска [Михалев и др., 2018].



Примеры SAR-дуг, наблюдаемых в ГФО ИСЗФ СО РАН, в течение двух магнитных бурь.

Слева: 17 марта 2015 г. Приведен кадр пространственного распределения интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630 нм.

Справа: 23 апреля 2023 года. Псевдоцветное изображение собранное из кадров спектральных каналов 427.8 нм, 557.7 нм и 630 нм камеры всего неба оптических инструментов НГК.

SAR-дуги были открыты Д. Барбье в 1958 г. [Barbier, 1958]. SAR-дуга – это относительно редкое оптическое явление, наблюдаемое в субавроральных широтах во время геомагнитных бурь. SAR-дуги имеют протяженность с севера на юг от 300 до 1200 км, с запада на восток – тысячи километров. Высота высвечивания – от 300 до 700 км. Основное излучение происходит в запрещенных линиях дуплета атомарного кислорода [OI] 630.0 и 636.4 нм с характерными интенсивностями от сотен рэлей до несколько кРл. SAR-дуги ориентированы вдоль геомагнитных параллелей, положительно коррелируют с геомагнитной активностью и наблюдаются преимущественно в фазу восстановления магнитных бурь. Время жизни типичной SAR-дуги составляет около суток, очень редко дуги наблюдаются в последующие дни.

Интерес к SAR дугам в последнее время возобновился в связи с открытием новых оптических явлений типа STEVE, “зеленый заборчик” и др. Интерес может усиливаться и с развитием нового 25-го солнечного цикла, увеличением уровня геомагнитной активности, прогнозированием больших геомагнитных бурь и их оптических проявлений. STEVE как отдельный тип субавроральной оптической структуры признан недавно [MacDonald et al., 2018] и относится к структурам, подобным по пространственным характеристикам SAR дугам, но отличается по спектральному составу и интенсивности. Он представляет собой дугу интенсивную фиолетового цвета, иногда сопровождаемую зелеными лучами на более низких высотах, известной как частокол [Yadav et al., 2022].

- Barbier D. Recherches sur la raie 630.0 de la luminescence atmospherique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V. 15, N 2. P. 179–217.
- MacDonald E. A., E. Donovan, Y. Nishimura, N. A. Case, D. M. Gillies, B. Gallardo-Lacourt, W. E. Archer, E. L. Spanswick, N. Bourassa, M. Connors, M. Heavner, B. Jackel, B. Kosar, D. J. Knudsen, C. Ratzlaff, I. Schofield New science in plain sight: Citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere // Sci. Adv. 2018. Vol. 4.
- Yadav, S., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Connors, M., and St. Maurice, J.-P. (2021a), Multi-wavelength imaging observations of STEVE at Athabasca, Canada. Journal of Geophysical Research: Space Physics , 125.

Полярное сияние 1859 года

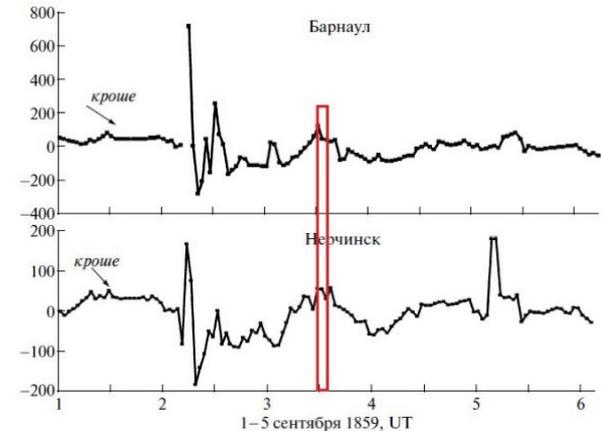
Обзор геомагнитных бурь августа – сентября 1859 приводит к «событию Кэррингтона», комплекса экстремальных явлений на Солнце и Земле, включая мощнейшую магнитную бурю за всю историю наблюдений. Геомагнитная буря началась 1-2 сентября 1859 г (дата дается по западноевропейскому времени, по новому стилю для России, к которому Россия присоединилась только 1918 г, разница между старым и новым стилем на тот период составляла 13 дней). Величина Dst индекса для этой бури оценивается специалистами от -1760 нТл до -900 нТл. Величина Dst индекса этой магнитной супербури является экстремальным отрицательным магнитным 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 часа. Местоположение плазмопаузы Земли во время главной фазы магнитной бури оценивалась как $L = 1.3$, полученное из информации об авроральных наблюдениях [Lakhina and Tsurutani, 2016].

- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Lakhina, G. S., Alex, S. (2003) The extreme magnetic storm of 1-2 September 1859, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 108, A7.
- Lakhina Gurbax S. and Tsurutani Bruce T. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view Geosci. Lett. (2016) 3:5

Полярное сияние 1859 года

Согласно [Тясто и др., 2009] 2 сентября по архивным магнитным данным российской сети наблюдений того времени на всех станциях между 04 и 06 UT началось очень сильное кратковременное магнитное возмущение (длительностью $t = 1-2$ час). В промежутке $\sim 4:30 - 6:30$ UT часовые значения H компоненты магнитного поля резко увеличиваются и выходят за шкалу измерений на станциях Санкт-Петербурга, Екатеринбургa и Барнаула. Исключение составляет станция Нерчинск. Вероятно, этот интервал времени может соответствовать главной фазе магнитной бури. Немедленно после этого начался второй возмущенный период длительностью $t \sim 14$ ч, а затем третий – с $t \sim 22$ ч. На рисунке приведен фрагмент рисунка из работы [Тясто и др., 2009] с часовыми значениями отклонений от среднего H -компоненты магнитного для двух станций Барнаул (53° N, 82° E) и Нерчинск (51° N, 117° E) за 1-5 сентября 1859 г.

Прямоугольником указано время наблюдения полярного сияния в Иркутске (52° N, 103° E). Город Иркутск по долготе находится посередине между станциями Барнаул и Нерчинск на близких широтах. На рисунке также указан также интервал времени наблюдения кроше, связанный с потоком большим потоком ионизирующего электромагнитного излучения во время Кэррингтоновской солнечной вспышки (между 11 и 12 UT 1 сентября 1859 г). Отмечается, что 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.



Часовые значения H -компоненты магнитного поля (отклонения от среднего), измеренные на обсерваториях Барнаула и Нерчинска с 1 по 5 сентября 1859 г.

SAR-дуги можно считать оптическим проявлением магнитосферно-ионосферно-термосферного взаимодействия в средних широтах. Излучение SAR-дуги в эмиссии 630.0 нм обусловлено поступающей из магнитосферы в термосферу вдоль магнитного поля Земли теплового потока энергии, возникающей при взаимодействии усиленного во время магнитной бури кольцевого тока – с плазмосферой Земли в области плазмопаузы [Baumgardner, et al., 2008]. В связи с этим многие авторы связывают SAR-дуги с магнитосферной проекцией плазмопаузы на F2 область ионосферы Земли.

Как уже отмечалось выше местоположение плазмопаузы Земли во время главной фазы магнитной бури 2-3 сентября 1859 г оценивается как $L = 1.3$ [Lakhina and Tsurutani, 2016]. Иркутск и ГФО имеют близкие исправленные геомагнитные широты $\sim 47^0$ и соответствующие L оболочки ~ 2 . Поэтому есть основание считать, что проекция плазмопаузы Земли во время магнитной бури 2-3 сентября 1859 г могла находиться на небосводе г. Иркутска и дважды пересекать зенит над ним.

Зная зависимость L оболочки от Dst индекса [Хорошева,2007], можно оценить величину Dst индекса, которая для рассматриваемого момента времени возможного наблюдения SAR-дуги над Иркутска в 1859 составляет значение в диапазоне $\sim - (300-400)$ нТл. К сожалению, из-за эффекта насыщения зависимости L оболочки от Dst индекса при $L \leq 2$ точность таких оценок не может являться достаточно высокой. С другой стороны имеются зенитные наблюдения SAR-дуги 31 марта 2001 г в ГФО на фазе восстановления магнитной бури при текущих значениях Dst $\sim - 300$ нТл [Дегтярев и др., 2003].

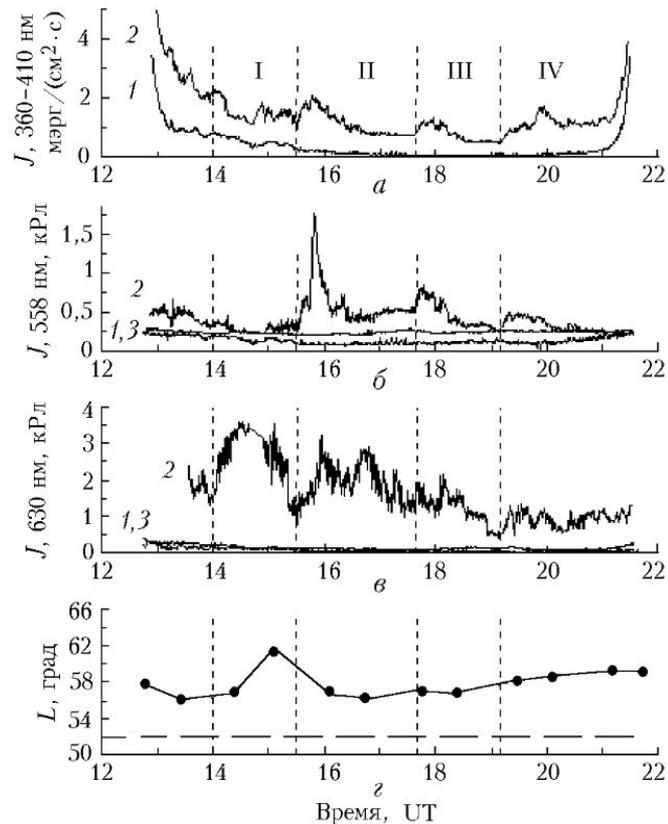
- Хорошева О.В. Связь геомагнитных возмущений с динамикой магнитосферы и параметрами межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т.47. №5. С.579-583.
- Baumgardner J., Wroten J., Semeter J., Kozyra J., Buonsanto M., Erickson P., Mendillo M. A very bright SAR arc: implications for extreme magnetosphere-ionosphere coupling. *Annales Geophysicae*, 2008, 25 (12), pp.2593-2608. fhal-00318424
- Lakhina Gurbax S. and Tsurutani Bruce T. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view *Geosci. Lett.* (2016) 3:5

В отличие от обычных полярных сияний, видимых во время геомагнитных бурь, SAR-дуги в большинстве случаев имеют субвизуальные (ниже порога чувствительности глаза) интенсивности. И лишь в очень редких случаях SAR-дуги имеют уровень яркости, доступной для наблюдения невооруженным глазом [Baumgardner et al., 2008]. При этом следует подчеркнуть некоторую противоречивость в вопросе наблюдаемых экстремальных абсолютных интенсивностей SAR-дуг.

В работе [Hoch,1973] отмечается, что для периода МГГ 1957-1958 гг значение ~ 1 кРл является типичным значением интенсивности SAR-дуг с максимальным обнаруженным значением 10 кРл в 1958 г. В работе [Baumgardner et al., 2008] авторы детально анализируют условия возникновения SAR-дуги с интенсивностью 13 кРл 29 октября 1991 г. И наконец, есть сообщение об интенсивности SAR-дуги 125 кРл [Roach and Roach,1963].

Интенсивность зарегистрированной в ГФО 31 марта 2001 г в 14-15 UT SAR-дуги оценивается величиной 1.5- 2.0 кРл [Дегтярев и др., 2003]

- Дегтярев В.И., Михалев А.В. и Jiуао Хи. Вариации свечения ночного неба в Восточной Сибири в период магнитной бури 31 марта – 4 апреля 2001 г. // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т.16. N. 5-6. С.552-556.
- Baumgardner J., Wroten J., Semeter J., Kozyra J., Buonsanto M., Erickson P., Mendillo M. A very bright SAR arc: implications for extreme magnetosphere-ionosphere coupling. *Annales Geophysicae*, 2008, 25 (12), pp.2593-2608.
- Hoch, R. J.: Stable auroral red arcs, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 11, 935–949, 1973.
- Roach, F. E. and Roach, J. R.: Stable 6300 °A auroral arcs in midlatitudes, *Planet. Space Sci.*, 11, 523–545, 1963.



Вариации интенсивностей свечения атмосферы 31 марта 2001 в спектральной полосе 360-410 нм (а), в линиях атомарного кислорода 558 нм (б), 630 нм (в) и положение экваториальной стенки овала полярных сияний (г)

Существование интенсивностей SAR-дуг в диапазоне 6–10 кРл могут быть подтверждено сообщениями о визуальных полярных сияниях в низких широтах в корейских исторических записях XVI–XVII веков. В работе [Zhang, 1985] сообщается о наблюдениях полярных сияний в Корее в период с 1507 по 1747 год нашей эры. На основании всех их характеристик, взятых из описаний этих отчетов и нескольких статистических анализов, автор полагает, что большинство из них не были обычными полярными сияниями, а, скорее всего, были SAR-дугами.

В настоящее время подобные явления регистрируются как с помощью научных приборов так и с помощью любительских фотокамер. Например, в работе [Martinis et al., 2022] сообщается о регистрации яркой широкой SAR дуги, переходящей в тонкую бело-лиловую дугу, определенную как STEVE. Явление было зарегистрировано во время МБ 17 марта 2015 года в двух пространственно разнесенных пунктах. В Данидине (Новая Зеландия, $45,95^\circ$ ю.ш., $170,32^\circ$ в.д.) дуга была заснята с помощью бытовой фотокамеры. Одновременно камера всего неба в обсерватории Маунт-Джон ($43,99^\circ$ ю.ш., $170,46^\circ$ в.д., в 200 км к северу от Данидина) зарегистрировала чрезвычайно яркую дугу на длине волны 630,0 нм с максимальной интенсивностью ~ 6 кРл. Позже в 09:45 UT SAR дуга изменила свою ширину и характеристики излучения и превратилась в тонкую бело-пурпурную структуру, напоминающую типичный STEVE, при этом также наблюдались структуры зеленого частотола, быстро движущиеся вдоль дуги.

- Martinis, C., Nishimura, Y., Wroten, J., Bhatt, A., Dyer, A., Baumgardner, J., & Gallardo-Lacourt, B. (2021). First simultaneous observation of STEVE and SAR arc combining data from citizen scientists, 630.0 nm all-sky images, and satellites. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2020GL092169.
- Zhang, Z.: Korean auroral records of the period AD 1507–1747 and the SAR arcs, *J. Brit. Astron. Assoc.*, 95, 205, 1985.

Выводы

- Предварительно оценено, что наблюдаемое полярное сияние в Иркутске в 1859 г. с большой долей вероятности является SAR-дугой. Используя архивные магнитные данные российской сети наблюдений того времени [Тясто и др., 2009], установлено, что SAR-дуга в г. Иркутске приходится на фазу восстановления этой магнитной супербури.
- Нижний порог интенсивности SAR-дуги 1859 г, описанной в иркутских летописях, может быть оценен как $\geq 6-10$ кРл (порог чувствительности глаза на длине волны 630 нм). К сожалению, из-за выхода значений за шкалу измерений на магнитных станциях при $L \leq 2$, точность таких оценок не может являться достаточно высокой.
- Проекция плазмопаузы на ионосферу 3 сентября 1859 г около 12 UT приходилась на широту г. Иркутска.
- Можно допустить, что на текущий момент приведенный выше текст описания полярного сияния 21 августа 1859 года в Иркутске является первым предметным описанием «иркутской» SAR-дуги, за век до ее открытия как явления [Barbier, 1958]. Несомненно, что человечество не раз наблюдало это явление в средних широтах в древние века.
- 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 аэрномия. 2009. Том 49. № 2. С. 163–173.
- Barbier D. Recherches sur la raie 630.0 de la luminescence atmospherique nocturne // Ann. Geophys. 1959. V. 15, N 2. P. 179–217.

Спасибо за внимание

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278), в рамках базового проекта «Геофизический мониторинг и комплексные наблюдения параметров атмосферы Земли и околоземного космического пространства для исследований в солнечно-земной физике»