

## **Структура и динамика среднеширотных сияний в 25-м солнечном цикле по данным оптических инструментов Национального Гелиогеофизического комплекса РАН**

А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, А.В. Михалев<sup>1</sup>, Т.Е. Сыренова<sup>1</sup>, Р.В. Васильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а.  
E-mail: beletsky@iszf.irk.ru*

*Среднеширотные сияния (СС) — геофизическое явление, редко наблюдаемое невооружённым глазом. Субвизуальные СС по некоторым данным наблюдаются чаще. Наблюдение таких форм СС как стабильные красные авроральные дуги (SAR-дуги) в средних широтах ранее считалось крайне редким. Регулярные наблюдения в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (103°04'31" в.д. 51°48'38" с.ш.) в периоды 23-го и 24-го солнечных циклов показали, что SAR-дуги наблюдались только во время четырех геомагнитных бурь. Оптическими инструментами Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) в начале двадцать пятого цикла солнечной активности (с апреля 2021 г по май 2024 г включительно) зарегистрировано 45 СС. Из них в 26 случаях в свечении наблюдались структуры, соответствующие SAR-дугам. Стоит отметить, что как минимум в одном случае наблюдалась SAR-дуга с дополнительными слабыми излучениями 557,7 нм и 427,8 нм. Кроме того, одно из зафиксированных событий наблюдалось на двух камерах всего неба, разнесенных в пространстве. Таким образом, уже можно привести первичные статистические данные о частоте регистрации СС и их структур, подобных по пространственным и спектральным характеристикам SAR дугам, наблюдаемых на фазе роста активности Солнца. Полученные сведения позволили оценить зависимости широтного расположения зарегистрированных структур от индекса Dst*

*Ключевые слова: верхняя атмосфера, геомагнитные бури, собственное свечение атмосферы, среднеширотные сияния*

## **Structure and dynamics of mid-latitude auroras in the 25th solar cycle according to optical instruments of the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences**

A.B. Beletsky<sup>1</sup>, A.V. Mikhalev<sup>1</sup>, T.E. Syrenova<sup>1</sup>, R.V. Vasilyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of solar-terrestrial physics SB RAS.*

*Mid-latitude auroras (MA) are a rare geophysical phenomenon, however, according to some researches subvisual MA are observed more often. In addition, the observation of stable red auroral arcs (SAR arcs) in mid-latitudes was previously considered an extremely rare phenomenon. During regular observations at the Geophysical Observatory ISTP SB RAS (103°04'31" E 51°48'38" N) during the 23rd and 24th solar cycles, SAR arcs were recorded only in time of four geomagnetic storms.*

*Optical instruments of the National Heliogeophysical Complex (NHC) at the beginning of the cycle 25 of solar activity (from April 2021 to May 2024 inclusive) registered 45 MA. In 26 cases in these structures corresponding to SAR arcs were observed in the airglow. It is worth noting that in at least one case, a SAR arc was observed with additional weak emissions at 557.7 nm and 427.8 nm. In addition, one of the recorded events was observed on two all-sky cameras separated in space. Thus, it is already possible to provide primary statistical data on the frequency of MA and their structures registration, similar in spatial and spectral characteristics to SAR arcs observed during the increasing solar activity phase. The information obtained made it possible to estimate the dependence of the latitudinal location of the registered structures on the Dst index.*

*Keywords: upper atmosphere, geomagnetic storms, airglow, Mid-latitude auroras*

## **Введение**

На настоящий момент проведено довольно много исследований среднеширотных сияний (СС) в различных долготных секторах, но при этом в литературе отсутствует общепринятое понятие СС. В многочисленных статейных публикациях и монографиях (см., например, [1]), посвященных обычным полярным сияниям, среднеширотным сияниям посвящены отдельные разделы. Ряд авторов использует понятие «низкоширотная аврора», с которым связывают авроральные эмиссии, наблюдаемые во время магнитосферных бурь (МБ) на геомагнитных широтах  $\leq 50^\circ$ . В то же время другие авторы применяют термин «среднеширотная аврора», используя в качестве отличительных признаков особенности механизмов усиления среднеширотных эмиссий в период МБ, наличие в спектре эмиссии  $N_2^+$  и/или высокое отношение интенсивностей эмиссии [OI] 630.0 и 557.7 нм [2]. В периоды больших МБ происходит сдвиг аврорального овала в средние широты синхронно с движением границы плазмосферы и других границ, зависящих от структуры магнитосферы [3]. В средних широтах мощные МБ сопровождаются значительным усилением запрещенной линии атомарного кислорода [OI] 630.0 нм, когда эта интенсивность, являясь относительно слабой компонентой в среднеширотном свечении верхней атмосферы, в течение нескольких часов может возрасти в десятки раз, трансформируясь в явление СС. Основной доминирующей эмиссией СС является дублет атомарного кислорода [OI] 630.0-636.4 нм, что может быть одним из отличительных признаков от полярных сияний в высоких широтах, в которых наиболее интенсивной линией обычно является эмиссия [OI] 557.7 нм. Это связано с различными проекциями магнитосферных структур на верхнюю атмосферу и ионосферу во время магнитной бури, и, соответственно, различной энергией возбуждающих частиц и различными высотами высвечивания сияний.

Стабильные красные авроральные (SAR) дуги - довольно редко наблюдаемые крупномасштабные структуры в субавроральных и средних широтах. В субавроральной ионосфере происходит ряд высокодинамичных процессов, связанных с конвекционным электрическим полем, взаимодействием захваченных энергичных частиц и тепловой плазмой, вызывающих формирование различных типов оптических особенностей в этой области [4]. Интерес к SAR-дугам в последнее время возобновился в связи с открытием новых оптических явлений типа Strong Thermal Emission Velocity Enhancement (STEVE), “зеленый заборчик” и др., при сохранении интереса к другим типам СС во время больших магнитных бурь типа октября-ноября 2003. Интерес усиливается и с развитием нового 25-го солнечного цикла, увеличением уровня геомагнитной активности, прогнозированием больших геомагнитных бурь и их оптических проявлений в виде СС.

## **Оптические инструменты**

В состав оптических инструментов (ОИ) Национального Гелиогеофизического комплекса (НГК) входят камеры всего неба, интерферометры Фабри-Перо, фотометры и спектрометры видимого и инфракрасного диапазонов [5]. Две камеры всего неба «KEO Sentry 4» обеспечивают регистрацию пространственного распределения интенсивности основных атмосферных линий. Поле зрения камер составляет  $180^\circ$ . Выбор спектрального диапазона осуществляется с помощью автоматического барабана интерференционных фильтров. Время экспозиции для каналов с узким спектральным диапазоном составляет 55 секунд, а для широкополосного ОН-канала – 7 секунд. Интерферометры Фабри-Перо предназначены для измерения температуры и скорости ветра на высотах высвечивания основных эмиссий верхней атмосферы Земли. Также в состав ОИ НГК входят спектрометр видимого диапазона "KEO Spectrograph::VISIBLE" (поле зрения  $\sim 10^\circ$ , спектральный диапазон 400 – 1000 нм, время экспозиции одного спектрального интервала 120 с) и инфракрасный спектрометр "KEO

Spectrograph::INFRARED" (поле зрения  $\sim 13^\circ$ , спектральный диапазон 950 – 1650 нм, время экспозиции одного спектрального интервала 20 с). В двухканальных фотометрах «KEO Arges-VF», обеспечивающих измерение быстрых вариаций основных эмиссий среднеширотной верхней атмосферы, используются фотоумножители в режиме счета фотонов. Поле зрения можно регулировать от  $1^\circ$  до  $10^\circ$  с помощью программно управляемого входного объектива. Временное разрешение составляет 10 мс.

На рисунке 1 показан спектр свечения ночного неба в спектральном диапазоне 400 - 900 нм, полученный с помощью спектрометра KEO Spectrograph::VISIBLE и спектральные каналы камер всего неба с примерами кадров.

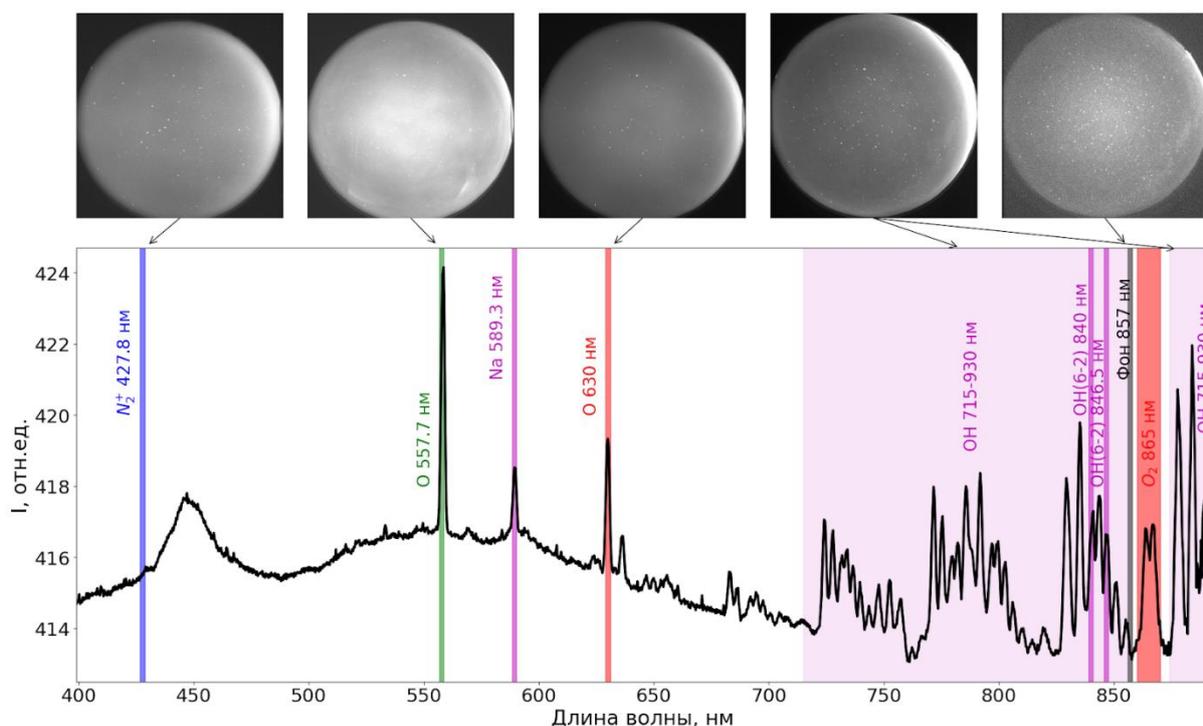
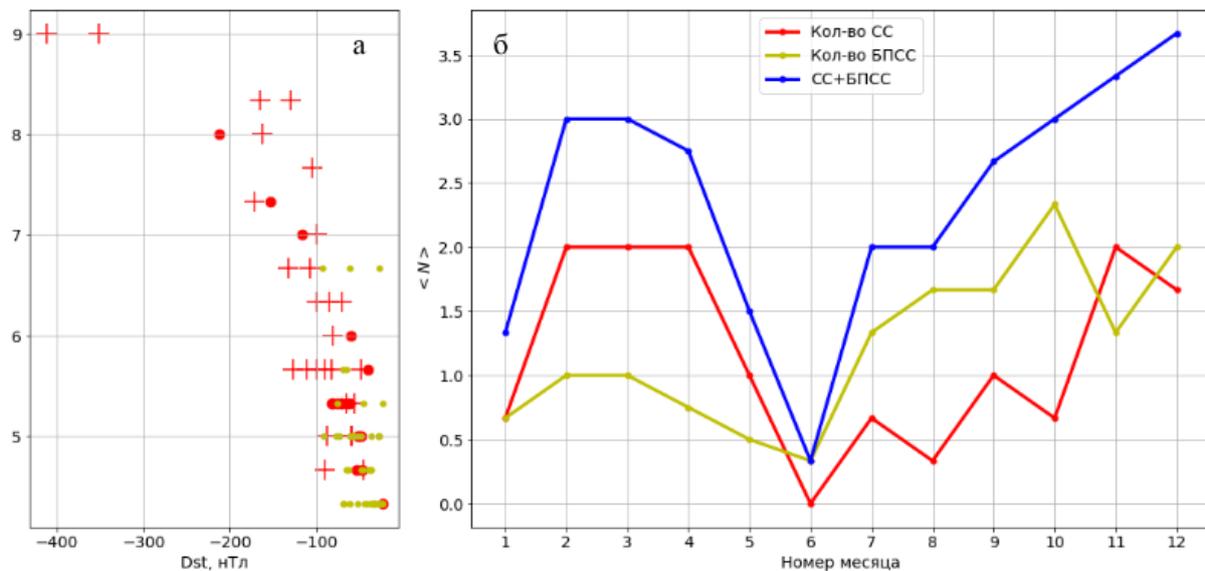


Рис. 1. Спектр свечения ночного неба в диапазоне 400 - 900 нм (нижняя панель, усредненный спектр за 23.01.2023), полученный с помощью KEO Spectrograph::VISIBLE. Спектральные каналы камер всего неба выделены цветом. На верхней панели показаны примеры кадров изображения всего неба для некоторых спектральных каналов (указаны стрелками)

## Результаты

В настоящее время поиск проявлений геомагнитной активности в свечении верхней атмосферы по данным камер всего неба осуществляется в ручном режиме. Для повышения точности и облегчения работ по выявлению возмущений были получены статистические данные о регистрации среднеширотных сияний (СС) камерами всего неба в зависимости от геомагнитной обстановки. В качестве индикаторов геомагнитной возмущенности были выбраны индексы Kp и Dst. Кроме этого обращалось внимание на наличие структур, подобных по пространственным характеристикам SAR-дугам. На основе этих данных были получены пороговые геомагнитные индексы, при которых оператором в ручном режиме на кадрах камер всего неба в канале 630 нм различались среднеширотные сияния, в том числе пространственные структуры, подобные по своим характеристикам SAR дугам. Полученное распределение видимости среднеширотных сияний приведено на рис. 2а (красные маркеры). Далее по полученным пороговым геомагнитным индексам были оценены благоприятные периоды для регистрации СС с помощью камер всего неба. То есть периоды, в которые камеры всего неба были в

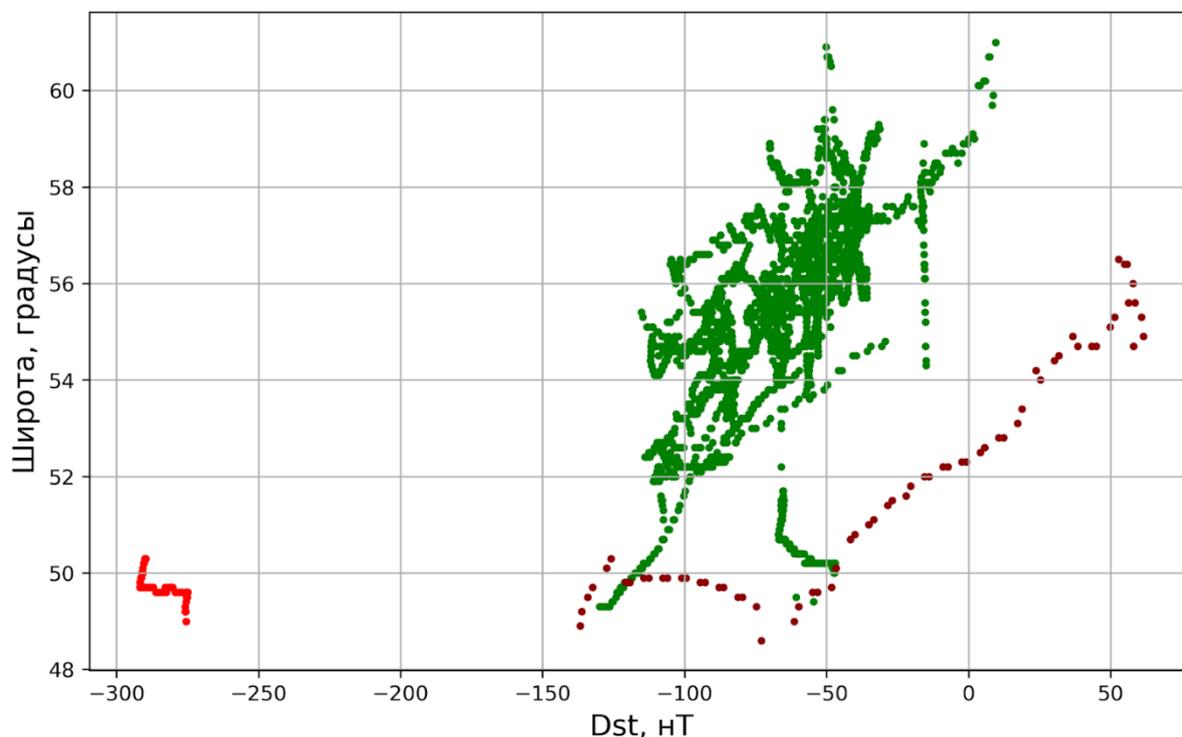
рабочем мониторинговом режиме, и выполнялись ранее полученные условия по геомагнитным индексам ( $Dst \leq -25$  и  $Kp \geq 4.3$ ), но при этом сияние зарегистрировано не было (показано желтыми маркерами на рис.2а). Отсутствие сияния на кадрах камер всего неба для этих периодов, в том числе, может быть обусловлено присутствием облачности или неблагоприятных условий наблюдения, связанных со свечением Луны. Далее был получен сезонный ход количества зарегистрированных СС в месяц (рис. 2б, красная кривая) и количества “благоприятных” периодов для развития СС (БПСС, рис. 2б, желтая кривая). На рис. 2б также приведена сумма зарегистрированных СС и ожидаемых СС (синяя кривая). Несмотря на низкую статистику, в годовой зависимости количества ожидаемых СС можно проследить тенденцию к увеличению количества сияний в весенний и осенний период, в соответствии с эффектом сезонной вариации геомагнитной активности Рассела - Мак Феррона [6].



**Рис. 2. Распределение регистрации СС камерами всего неба в зависимости от геомагнитных индексов  $Kp$  и  $Dst$  (красным) (а). Регистрация дугообразных структур обозначена маркером “+”. Желтыми маркерами показаны периоды времени с “благоприятными” геомагнитными условиями для появления СС. б) - Динамика среднего за месяц количества зарегистрированных СС в месяц с 2021 по 2024 год (красным цветом). Желтым цветом показано усредненное количество «благоприятных» периодов в месяц для возникновения СС**

Известно, что широтные распределения частоты наблюдения SAR-дуг во время геомагнитных бурь в большей степени обусловлены состоянием кольцевого тока Земли и, соответственно, вариациями значений  $Dst$ -индекса. На меридиане г. Якутска вероятная исправленная геомагнитная широта наблюдения SAR-дуг равна  $\sim 55^\circ$  (ст.Маймага, географическая широта  $63^\circ$ ) [7]. В работе [8] авторы, 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  $Dst$  и  $Kp$  индексами. При этом ярким SAR-дугам с интенсивностями 11-13 кРл соответствовали значения  $Dst$  индекса  $\sim -210$ -220 нТл. В ходе настоящего исследования было получено распределение географической широты наблюдаемых SAR дуг в зависимости от индекса  $Dst$  по данным камер всего неба НГК (рис. 3). Для этого географически привязанный для высоты 300 км кадр усреднялся по долготе с широтным шагом 0.1 градуса. Далее убирался низкочастотный тренд. Оператор выбирал кадр с

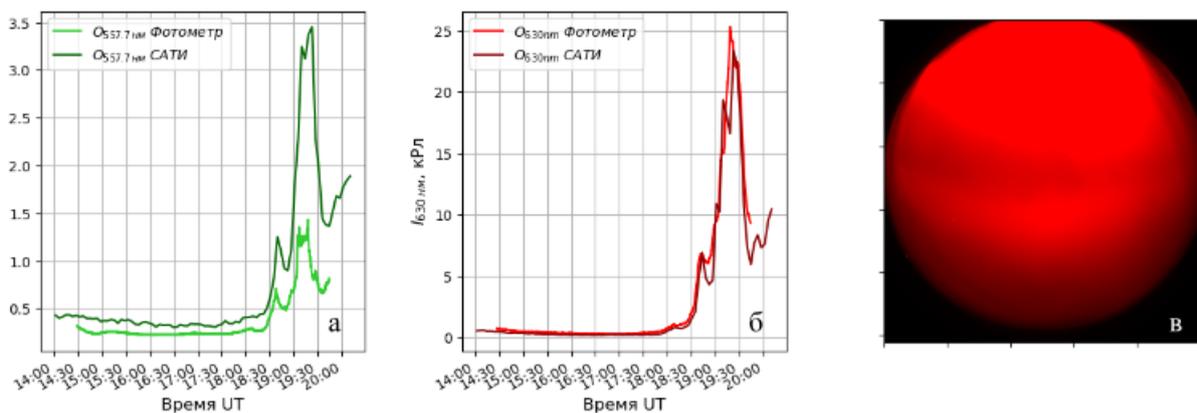
хорошо различающейся SAR дугой и задавал начальные параметры (время кадра и широта дуги на этом кадре) для дальнейшего автоматического поиска. В алгоритме автоматического поиска положения SAR дуги отслеживается локальный максимум интенсивности дуги с учетом пороговых значений, таких как максимальный сдвиг максимума по широте в последовательных кадрах и амплитуда локального максимума.



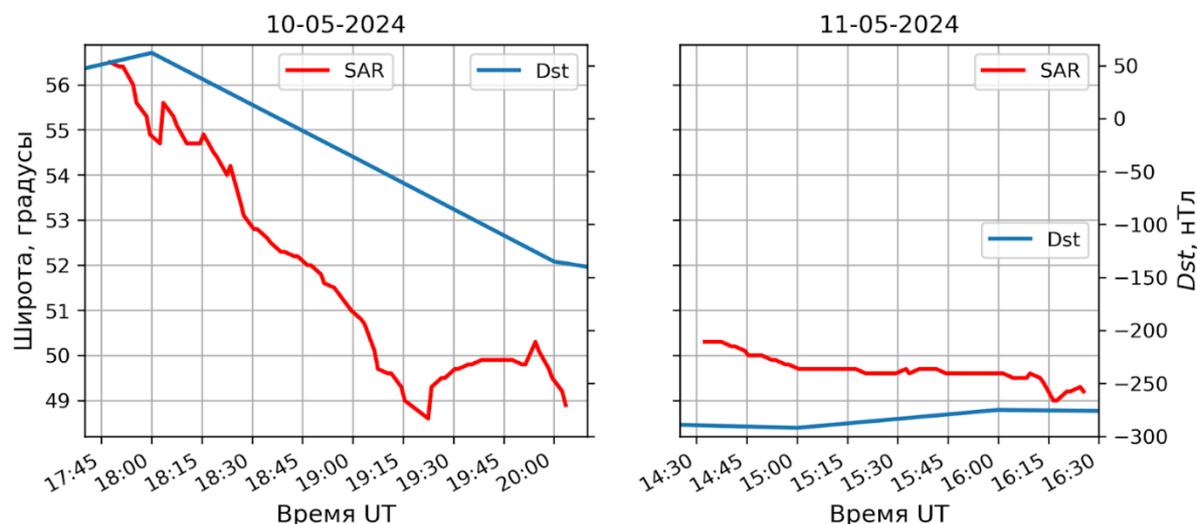
**Рис. 3. Распределение географической широты расположения максимума интенсивности SAR дуги в зависимости от индекса Dst. Расчет для высоты 300 км. Темно-красным и красным цветом выделено распределение для 10 и 11 мая 2024 г соответственно.**

Подобные зависимости позволяют выделить случаи с нетипичной динамикой структур СС. Так, одной из отличающихся от среднего распределения бурь является экстремальная буря 10-12 мая 2024 г (выделено цветом на рис. 3). Во время этой бури были зарегистрированы несколько типов среднеширотных сияний [9], включая тип «d», SAR- дуги и, возможно, сияния, вызываемые высыпанием тяжелых частиц. Сияния типа «d» по своей динамике и интенсивности были подобны или превосходили по некоторым характеристикам сияния, наблюдаемые во время экстремальных бурь октября-ноября 2003 г. [2]. Доминирующим излучением в сиянии типа «d» являлись запрещенные линии атомарного кислорода [OI] 630.0 и 557.7 нм, с отношением интенсивностей этих линий (I630/I557.7) в максимуме сияния до 15 над северным горизонтом (рис. 4, данные спектрометра САТИ) и до 30 в полюсе мира (рис. 4, данные фотометра). Интенсивность свечения [OI] 630.0 нм на главной фазе магнитной бури превысила 25 кРл (см. рис. 4б).

На рис. 5 приведен временной ход широтного положения SAR дуги по данным камер всего неба и временной ход индекса Dst 10 и 11 мая 2024 г. Предполагается, что SAR дуга могла присутствовать не менее 23 часов. Отслеживание дуги 11 мая 2024 года после 16:30 UT стало невозможным в связи с приходом сплошной облачности.



**Рис. 4. а) -** Динамика интенсивностей эмиссий [OI] 557.7 нм, **(б) - [OI] 630.0 нм** по данным спектрометра САТИ (направление визирования ~10 градусов над северным горизонтом) и фотометра НГК (направление визирования - северный полюс мира). **(в) -** кадр камеры всего неба в канале 630 нм за 19:03 UT 10.05.2024.



**Рис. 5. Временной ход широтного положения SAR-дуги и индекса Dst 10 и 11 мая 2024 г.**

### Выводы

Среднеширотные сияния - редкое геофизическое явление [10]. Однако, по данным [11], субвизуальные СС наблюдаются чаще. Кроме того, наблюдение SAR-дуг в средних широтах ранее считалось крайне редким явлением. По данным исследования [12] вероятность появления SAR-дуг уменьшается в Атабаске на субавроральных широтах во время более высокой геомагнитной активности, но в то же время увеличивается на более низких широтах. К тому же в работе [13] на основе анализа 27-летних наблюдений камер всего неба в Миллстоун-Хилл (42,6 ° с.ш., 288,5 ° в.д.) сообщается, что частота появления SAR-дуг была минимальной в годы солнечного минимума и максимальной в годы солнечного максимума, в отличие от того, что наблюдается в Атабаске (субавроральные широты). То есть согласно работам [12, 13] можно предполагать высокую вероятность регистрации структур типа SAR-дуг при наблюдениях в среднеширотной Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН в годы высокой солнечной активности. В периоды высокой активности 23-го и 24-го солнечных циклов ГФО ИСЗФ СО РАН не располагала высокочувствительными приборами с хорошим пространственным разрешением. Высокое количество зарегистрированных СС в 25-м солнечном цикле может быть связано с высокой интенсивностью солнечного цикла и, несомненно, связано с вводом в

эксплуатацию высокочувствительных оптических инструментов НГК. Оптические приборы НГК позволяют обнаруживать и фиксировать оптические проявления геофизических и геомагнитных возмущений в верхней атмосфере в диапазоне географических широт ~46-58 градусов северной широты. Пример мультиспектральных наблюдений в 2021-2024 гг. среднеширотных сияний и SAR-дуг показывает высокие пространственные, временные и спектральные характеристики и эффективность используемого оптического оборудования.

В настоящее время продолжается детальный анализ отдельных геомагнитных бурь и особенностей их оптических проявлений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП "Ангара" (ИСЗФ СО РАН) <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>.*

### Литература

1. Chamberlain Joseph.W. Physics of the Aurora and Airglow. 1961. Published by Academic Press Inc. (London) Ltd. 17, 17 Old Queen Street, London S.W. 1. 704 p.
2. Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N. A5. P. 7695–7709.
3. Лазутин Л. Л. Овал полярных сияний - прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика, 2015. Т. 1, № 1. С.23-35.
4. Frey, H. U. (2007). Localized aurora beyond the auroral oval. Reviews of Geophysics, 45(1), 1003. <https://doi.org/10.1029/2005RG000174>.
5. Васильев Р. В., Артамонов М. Ф., Белецкий А. Б., Жеребцов Г.А., Зоркальцева О.С., Комарова Е.С., Медведева И.В., Михалёв А.В., Подлесный С.В., Ратовский К.Г., Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Ткачев И.Д. Научные задачи оптических инструментов национального гелиогеофизического комплекса // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 105-122. – DOI 10.12737/szf-62202008. – EDN MIKJNS.
6. Russell, C. T., and R. L. McPherron (1973), Semiannual variation of geomagnetic activity, J. Geophys. Res., 78(1), 92–108, doi:10.1029/JA078i001p00092.
7. 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.
8. Rees M.H., Akasofu S.I. On the association between subvisual red arcs and the Dst (H) decrease //Planet. Space Sci. 1963.V.11. N2. P.105-107.
9. Михалев А.В, Белецкий А.Б, Костылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29-31 октября и 20-21 ноября 2003 г. // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 6. С. 616-621.
10. Krakovetsky Yu.K., Loisha V.L., Popov L.R. Chronologiya polyarnyh siyaniy za poslednee tysyacheletie // Solnechnye dannye. 1989. N. 2. p. 110–115. (in Russian)
11. Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, iss. A5. A05202. DOI: 10.1029/2004JA010706.
12. Yadav, S., Shiokawa, K., Otsuka, Y., & Connors, M. (2022). Statistical study of subauroral arc detachment at Athabasca, Canada: New insights on STEVE. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2021JA029856. <https://doi.org/10.1029/2021JA029856>.
13. Mendillo, M., Baumgardner, J., & Wroten, J. (2016). SAR arcs we have seen: Evidence for variability in stable auroral red arcs. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(1), 245–262. <https://doi.org/10.1002/2015JA021722>.