

**ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ В ПЕРИОДЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ:
ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕШИРОТНОГО СИЯНИЯ 11 ФЕВРАЛЯ 1958 Г.****AURORAS DURING EXTREME GEOMAGNETIC STORMS: SOME FEATURES
OF MID-LATITUDE AURORA ON FEBRUARY 11, 1958****А.В. Михалев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru***A.V. Mikhalev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе обсуждаются особенности среднеширотного сияния типа great aurora во время экстремальной магнитной бури 11 февраля 1958 г., которое обладало необычными оптическими и спектральными характеристиками: очень большой интенсивностью эмиссии атомарного кислорода [OI] 630 нм (10^5 – 10^8 Рл) I_{630} и необычно высоким отношением интенсивностей двух запрещенных линий кислорода [OI] 630 нм и 557.7 нм $I_{630}/I_{557.7}$, достигшим 10^3 – 10^4 . В результате анализа динамики I_{630} во время других экстремальных геомагнитных бурь, а также сопутствующих геофизических условий и физических процессов в ионосфере и магнитосфере Земли высказано предположение, что среднеширотные сияния типа great aurora формируются во время интенсивных суббурь на главных фазах магнитных бурь. Для интерпретации наблюдаемых особенностей среднеширотного сияния 11 февраля 1958 г. предлагается рассмотреть механизм селективного заселения уровня [OI] 1D , в котором могут быть реализованы реакции резонансной перезарядки ионов кислорода $O^+(^2D)+O(^3P)\rightarrow O^+(^4S)+O(^3P, ^1D)$ и/или реакции столкновения атомов и молекул кислорода с возбужденными компонентами нечетного азота.

Ключевые слова: среднеширотные сияния, магнитные бури, полярное сияние 11 февраля 1958 г.

Abstract. This paper discusses peculiarities of the great mid-latitude aurora that occurred during the extreme magnetic storm on February 11, 1958. This mid-latitude aurora had unusual optical and spectral characteristics, among which, first of all, were very high (10^5 – 10^8 R) intensities of atomic oxygen [OI] 630.0 nm emission and an unusually high ratio of the intensities of two forbidden lines of oxygen [OI] 630.0 nm and 557.7 nm ($I_{630}/I_{557.7}$). In some points, this ratio was as high as 10^3 – 10^4 . Analysis of I_{630} dynamics during other extreme geomagnetic storms and associated geophysical conditions and physical processes in Earth's ionosphere and magnetosphere allows us to assume that great mid-latitude auroras are formed during intense substorms in main phases of magnetic storms. In order to interpret the observed features of the February 11, 1958 mid-latitude aurora, we propose to examine the mechanism of level [OI] 1D selective filling in which reactions of resonance recharge of oxygen ions $O^+(^2D)+O(^3P)\rightarrow O^+(^4S)+O(^3P, ^1D)$ and/or reactions of oxygen atom and molecule collisions with excited components of odd nitrogen can be implemented.

Keywords: mid-latitude aurora, magnetic storms, February, 11 1958 great aurora.

ВВЕДЕНИЕ

Полярные сияния в низких и средних широтах являются чрезвычайно редкими событиями, обычно связанными с сильной магнитной бурей и корональными выбросами массы, направленными на Землю [Berrilli, Giovannelli, 2022; Knipp et al., 2021]. Сияния с очень высокой визуальной яркостью, которые наблюдаются исключительно в низких и средних широтах, относят к great aurora [Vallance, 1992]. Экстремальные условия космической погоды, приведшие к чрезвычайно сильным магнитным бурям такие как события сентября 1770 г., сентября 1859 г. (событие Кэррингтона), февраля 1872 г., мая 1921 г., 11 февраля 1958 г., 1–2 марта 1989 г. (Квебекское событие), практически всегда сопровождалась в средних и низких широтах интенсивными сияниями типа great aurora. Наблюдения таких сияний выявили особенности их как спектральных и цветовых характеристик, так и морфологии и структуры — большие

высоты образования и распространение на низкие широты. Теоретические исследования привели к некоторому пониманию необычных спектроскопических характеристик среднеширотных сияний, включая их ярко-красный цвет и аномальную колебательную и вращательную структуру молекулярных полос [Vallance, 1992]. В настоящее время не существует общепринятого определения понятия great aurora и не установлены оптические параметры этого явления. Следовательно, необходимо уточнение наблюдаемых характеристик отдельных событий с целью последующей их систематизации.

В настоящей работе на примере сияния 11 февраля 1958 г. делается попытка обсудить характерные параметры сияний, в первую очередь оптические и спектральные, позволяющие относить среднеширотные сияния к great aurora. Выбор события 11 февраля 1958 г. был обусловлен аномально высокими значениями интенсивности авроральной эмиссии атомарного кислорода [OI] 630.0–636.4 нм. Допол-

нительной задачей являлось сопоставление с характеристиками среднеширотных сияний, наблюдавшихся в последнее время.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Одиннадцатого февраля 1958 г. во время экстремальной магнитной бури ($K_p=9$, $Dst_{\min}=-426$ нТл) произошло красное полярное сияние, которое наблюдалось на территории Мексики, Северной Америки, СССР и Японии [Manring, Pettit, 1959; Akasofu, Chapman, 1962; Евлашин, 1962; Шуйская, 1967; Hikosaka, 1958].

Согласно работе [Akasofu, Chapman, 1962], во время магнитной бури 11 февраля 1958 г. по данным камер всего неба в Северной Америке, в Восточной Сибири и Японии регистрировались резкие изменения в распределении полярных сияний. Сияния отмечались в полосах различной ширины, лежащих параллельно зоне полярных сияний. На главной фазе магнитной бури их северная граница существенно колебалась одновременно с возникновением магнитосферных суббурь.

В Северном полушарии сияние наблюдалось до геомагнитной широты $\sim 40^\circ$ ($L \sim 1.5$). По данным работы [Шуйская, 1967], самым необычным в спектральном составе этого сияния было следующее:

- отношение интенсивностей двух запрещенных линий кислорода 630 нм и 557.7 нм $I_{630}/I_{557.7}$ достигало в отдельные моменты 10^3-10^4 , тогда как в обычных полярных сияниях $I_{630}/I_{557.7} \leq 1$, в высоких формах красных полярных сияний $I_{630}/I_{557.7} \leq 10$.
- присутствие очень интенсивной линии гелия He 1083 нм
- аномальная колебательно-вращательная структура молекулярных полос NGN_2^+ .

Евлашин [1962] сияние 11 февраля 1958 г., наблюдавшееся в зоне полярных сияний (ст. Мурманск), отнес к полярным сияниям красного цвета типа А, отметив его грандиозность по масштабам и яркости. Была зарегистрирована только начальная фаза этого сияния (01:00–05:00 GMT).

Интенсивная авроральная активность 11 февраля 1958 г. была зарегистрирована фотометрами в Сакраменто-Пик (32° N, 105° W, Америка, Нью-Мексико) и Тонанцингле (Мексика). В Сакраменто-Пик интенсивность изменялась от 10^5 до 10^8 Рл (~ 300 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) для эмиссии 630 нм и $\sim 10^3-10^4$ Рл для эмиссии 557.7 нм. Отношение $I_{630}/I_{557.7}$ составляло около 2.5×10^3 в течение всей ночи [Manring, Pettit, 1959].

В работе [Шефов, Юрченко, 1970] были представлены результаты наблюдения полярного сияния 11 февраля 1958 г. в Звенигороде (55° N, 37° E), полученные фотографическими методами. В этой работе, с учетом возможных ошибок (до множителя не менее 2–3), связанных с передержкой фотоматериала при регистрации эмиссий, приводятся интенсивности эмиссий 630 и 557.7 нм в отдельные часы 600 кРл и 11 кРл соответственно, что дает $I_{630}/I_{557.7} \sim 55$.

Инфракрасный спектр, охватывающий область 730.0–870.0 нм [Wallace, 1960], показывает, что в экстремальном красном сиянии 10/11 февраля 1958 г.

линии [OI] 777.4 и 844.6 нм усилены по крайней мере в пять раз по сравнению с обычным сиянием. Наиболее яркая особенность спектра — появление запрещенного $^2D-^2P$ -мультиплета [OII] 731.9 и 733.0 нм высокой интенсивности.

В средних широтах Азиатского континента жители Иркутска (52° N, 104° E), Благовещенска (50° N, 127° E) и других городов России 11 февраля 1958 г. наблюдали исключительно яркое полярное сияние в виде огромного зарева, в верхней части которого присутствовали световые столбы.

ОБСУЖДЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Зависимость I_{630} от геомагнитной активности

Обычно считается, что в средних широтах интенсивность эмиссии 630 нм достаточно хорошо коррелирует с геомагнитным Dst -индексом, величина которого обуславливается кольцевым током, возмущениями локального геомагнитного поля на близлежащих станциях и другими параметрами околоземного космического пространства [Трутце, 1973; Rassoul et al., 1992; Шефов и др., 2006; Михалев, 2019]. Так, в работе [Трутце, 1973] было получено эмпирическое соотношение для интенсивности эмиссии 630 нм низкоширотных красных сияний в зависимости от уровней солнечной активности, характеризуемой индексом $F10.7$, и геомагнитной возмущенности, характеризуемой Dst -индексом,

$$\lg I_{\text{gm}} = (F10.7 - 160) / 50 + (|\Phi| - 34) \times (-Dst) / 1460, \quad (1)$$

где I_{gm} — интенсивность эмиссии 630 нм в рэлях; $F10.7$ — интенсивность радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в sfu ($1 \text{ sfu} = 10-22 \text{ м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$); Φ — геомагнитная широта пункта наблюдения.

При больших возмущениях ($100 \leq -Dst \leq 300$) зависимость имеет вид [Трутце, 1973]:

$$\lg I_{\text{gm}} = (1.48 \pm 0.20) + [-Dst / (110 \pm 10)]. \quad (2)$$

Подобная зависимость интенсивности эмиссии 630 нм от Dst -индекса была получена и по данным наблюдений в средних широтах в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН (52° N, 103° E) с использованием, в частности, данных по экстрабурям 30 октября ($K_p=90$, $Dst_{\min}=-383$ нТл) и 20 ноября 2003 г. ($K_p=9-$, $Dst_{\min}=-422$ нТл) [Михалев, 2013, 2019]:

$$\lg I_{\text{gm}} = -0.0167 Dst - 4.14. \quad (3)$$

Связь интенсивности эмиссии 630.0 нм с Dst -индексом имеет физическое обоснование. Во время магнитных бурь взаимодействие захваченных частиц кольцевого тока с внешней плазмосферой может приводить к образованию потоков тепла в нижнюю термосферу, вызывая дополнительное оптическое излучение в эмиссии 630.0 нм, связанное со среднеширотными красными сияниями [Rassoul et al., 1993].

В то же время в работе [Rassoul et al., 1992] было показано, что временные вариации оптического из-

лучения некоторых полярных сияний в низких широтах хорошо коррелируют с временными вариациями H -компоненты на магнитограммах в регионе, где наблюдаются полярные сияния. Максимальное оптическое излучение в средних широтах происходит одновременно с максимальными положительными отклонениями H -компоненты магнитного поля на близлежащих станциях. Положительные отклонения H -компоненты магнитного поля в обсерваториях низких широт во время максимального оптического излучения коррелируют с отрицательными отклонениями H -компоненты магнитного поля в обсерваториях более высоких широт в том же секторе долгот. Авторы предположили, что источником частиц, вызывающих сияния на средних широтах, является кольцевой ток. В результате была предложена следующая качественная зависимость для интенсивности излучения в средних широтах во время геомагнитных возмущений [Rassoul et al., 1992]:

$$I = Dst \Delta H, \quad (4)$$

где ΔH — разница между максимумом и минимумом измеренной горизонтальной составляющей H магнитного поля на станции вблизи наблюдаемой области излучения в часовом интервале.

Авторы отмечают, что Dst -индекс является мерой полной энергии захваченных частиц кольцевого тока, а ΔH связано с изменениями локальных суббуравых ионосферных токов, обусловленных большими потоками электронов низкой энергии в термосфере.

На рис. 1 приведено поведение интенсивности эмиссии 630 нм во время больших (экстремальных) геомагнитных бурь по данным наблюдений в ГФО ИСЗФ СО РАН, для которых наблюдается тенденция к выполнению приведенных выше зависимостей (1)–(3) I_{gm} от Dst -индекса.

На рис. 2 приводится динамика интенсивности эмиссии 630 нм в сопоставлении с поведением Dst -индекса во время магнитных бурь 11 февраля 1958 г. и, для сравнения, 17 марта 2015 г., для которых зависимости (1)–(3) не выполняются. Следует отметить, что для бури 17 марта 2015 г. отношение $I_{630}/I_{557.7}$ было тоже достаточно высоким и составляло более 20 в отдельные моменты времени.

Данные по интенсивности эмиссии 630 нм для магнитной бури 11 февраля 1958 г. были получены путем оцифровки рис. 3 из работы [Manring, Pettit, 1959]. Значения Dst были взяты из базы всемирного центра данных по геомагнетизму Киото (Япония) [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html].

Для магнитной бури 17 марта 2015 г. (буря Святого Патрика) наиболее сильные увеличения интенсивности эмиссии 630 нм были зарегистрированы во время трех активизаций западного электроджета, развивавшихся при усилении магнитосферной конвекции [Золотухина и др., 2021].

Высокие интенсивности эмиссии 630 нм ($\sim 10^5$ – 10^8 Рл) в средних широтах во время полярного сияния 11 февраля 1958 г. не могут быть объяснены в рамках зависимостей от Dst -индекса (1)–(3), поскольку требуют нереально высоких значений Dst , практически не наблюдаемых в природе. Это обстоя-

тельство может указывать на существенное значение локальных суббуравых ионосферных и/или магнитосферных токовых систем (например, частичный кольцевой ток или токовый клин суббури [Sergeev et al., 2011]) в механизме формирования среднеширотных сияний с доминирующей эмиссией 630 нм. Известно, что изменения конфигурации геомагнитного поля в периоды магнитосферных бурь и суббурь меняют характер движения и ускорения заряженных частиц в магнитосфере и, в частности, влияют на формы полярных сияний [Николаев, 2015]. В работе [Shiokawa et al., 2005] на основании результатов наблюдений в 1999–2004 гг. в Японии говорится о существовании отдельной группы среднеширотных сияний, обусловленных суббуравыми активизациями. В более поздней работе [Михалев, 2019] сообщается, что магнитная буря Святого Патрика 17 марта 2015 г. также является исключением из обсуждаемых выше зависимостей (1)–(3).

Интересно, что авторы работы [Тясто и др., 2009] при анализе супербури 2–3 сентября 1859 г. (событие Кэррингтона), сопровождавшейся интенсивными красными сияниями на средних и низких широтах, отмечают, что характер вариаций H -компоненты свидетельствует о том, что во время этой бури на средних и высоких широтах наблюдалось очень большое усиление ионосферного и/или магнитосферного тока.

Вариации H -компоненты магнитного поля на высокоширотной станции Meapook (геомагнитная широта 61.8° N) 11 февраля 1958 г. [Akasofu, Chapman, 1962] косвенно указывают на суббуравые активизации, близкие по времени к усилениям интенсивности эмиссии 630 нм (см. рис. 2).

В ряде работ показана возможность проникновения энергичных ионов кольцевого тока во внешнюю плазмосферу в начале главной фазы магнитной бури [Фишкова, Марцвалдзе, 1985; Dmitriev, Yeh, 2008; Shiokawa et al., 2013] или на фазе развития суббури [Иевенко, Парников, 2022].

Связь I_{630} с ионосферными параметрами. Некоторые особенности возмущений ионосферы и динамики магнитосферного кислорода во время сильных бурь

В обзоре [Данилов, 2013] делается вывод, что во время очень сильных и экстремальных бурь наблюдается сильное возрастание электронной концентрации в верхней ионосфере, и отмечается, что ионизация ионосферы возросшими потоками энергичных частиц, наряду с прямым проникновением электрических полей, вносит вклад в образование буревых повышений концентрации ионов. Однако приведенные в этом обзоре величины ионосферных возмущений не указывают на возможность селективного заселения уровней ^1D атомарного кислорода. В обзоре [Akasofu, 2020] говорится о знаменательном открытии в физике магнитных бурь конца прошлого века — ионосферных ионах кислорода в кольцевом токе. Ионы кислорода инжектируются из ионосферы в хвост магнитосферы и нагнетаются обратно в пояс кольцевого тока. Следовательно, ионы кисло-

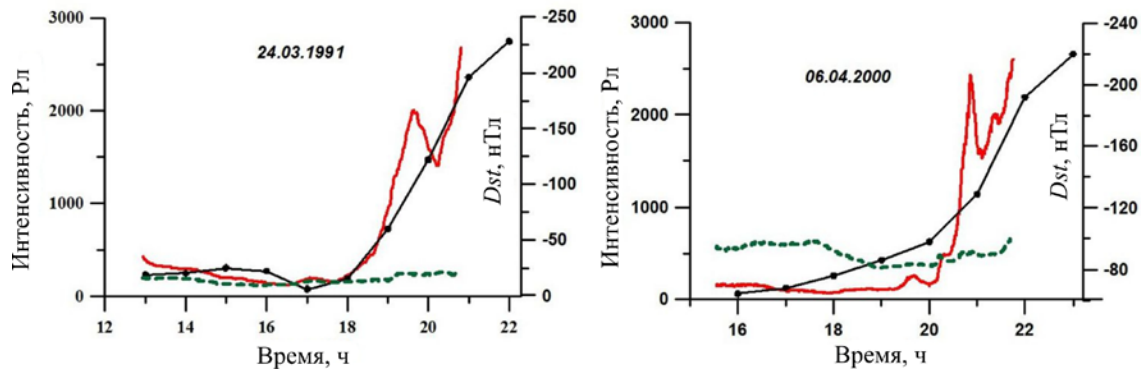


Рис. 1. Динамика интенсивности эмиссии [OI] 630.0 нм (красные линии) во время магнитных бурь 24 марта 1991 г. и 6 апреля 2000 г. по наблюдениям в ГФО ИСЗФ СО РАН в сопоставлении с динамикой *Dst*-индекса (черные линии); зеленые штриховые линии — интенсивность эмиссии 557.7 нм

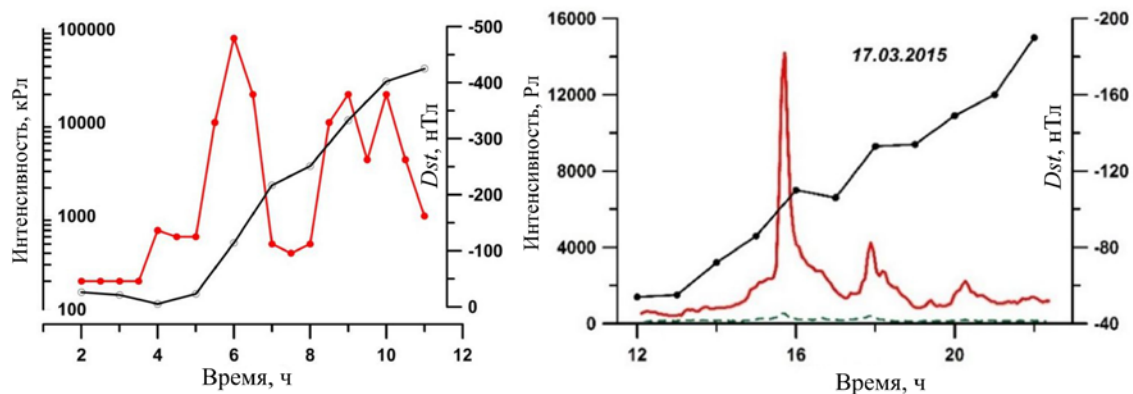


Рис. 2. Динамика интенсивности эмиссии 630 нм (красные линии) во время магнитной бури 11 февраля 1958 г. в Сакраменто-Пик (слева) [Manring, Pettit, 1959] и магнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. в ГФО ИСЗФ СО РАН (справа) в сопоставлении с динамикой *Dst*-индекса (черные линии); зеленая штриховая линия (справа) — интенсивность эмиссии 557.7 нм

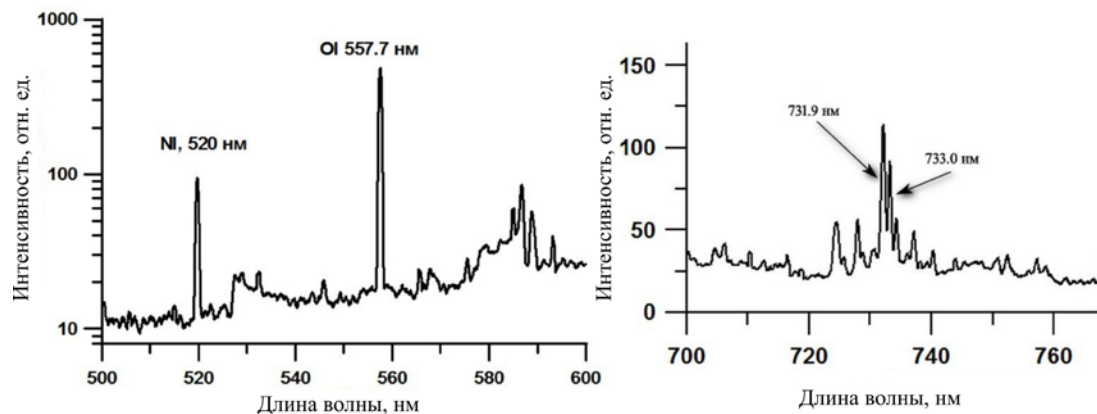


Рис. 3. Фрагменты спектра в диапазонах 500–600 нм [Михалев и др., 2018] и 700–760 нм, зарегистрированного во время магнитной бури 17 марта 2015 г. спектрографом Shamrock SR-303I

рода из ионосферы в большей степени, чем протоны, ответственны за интенсивные кольцевые токи. До этого долгое время считалось, что исключительно протоны солнечного ветра ответственны за кольцевой ток.

Таким образом, предварительно можно допустить, что высокие интенсивности всех сияний типа great aurora, или по крайней мере части из них, обусловлены интенсивными ионосферными и/или магнитосферными токами, возникающими во время суббурь вследствие существенного усиления частич-

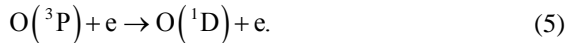
ного кольцевого тока или токового клина суббури. Напротив, интенсивности сияний во время больших геомагнитных бурь, приведенные на рис. 1, обуславливаются усилением симметричного кольцевого тока. Вероятно, в динамике эмиссии [OI] 630 нм во время конкретных сильных и экстремальных сияний можно отметить признаки проявления всех рассматриваемых магнитосферных токовых подсистем.

Исчезновение прямой зависимости интенсивности эмиссии [OI] 630 нм от *Dst*-индекса в бурях, подобных бурям 11.02.1958 и 17.03.2015, может быть свя-

зано также с методикой определения Dst -индекса (по четырем долготно-разнесенным станциям) и с долготной асимметрией в магнитном отклике H -компоненты на магнитосферные бури в дневном (отрицательном) и ночном (положительном) секторах среднеширотной магнитосферы [Saiz et al., 2021]. Saiz et al. [2021] отмечают, что наибольшая асимметрия имеет место на главной фазе магнитной бури (когда наблюдаются наибольшие интенсивности красных среднеширотных сияний) и регистрируется в узких секторах местного времени.

Очень большое отношение $I_{630}/I_{557.7}$ ($\sim 10^3$ – 10^4), зарегистрированное в полярном сиянии 11 февраля 1958 г., ставит под сомнение нагрев термосферы [Данилов, 2013] во время магнитных бурь как основную причину аномально высокой интенсивности эмиссии [OI] 630 нм.

Обычно считается (см., например, [Akasofu, 1989]), что увеличение интенсивности эмиссии 630 нм в средних широтах в период геомагнитных бурь объясняется возбуждением атомов кислорода нагретыми электронами при прямых столкновениях в реакции [Шефов и др., 2006; Дашкевич, Иванов, 2022]:



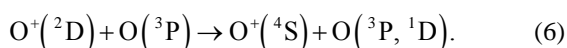
Однако (см. рис. 2), согласно [Rees, Luckey, 1974], отношение $I_{630}/I_{557.7}$ при столкновениях с электронами с максвелловской функцией распределения с характеристическими энергиями ~ 0.3 – 10 кэВ не превышает 10 на высотах 340–350 км. Расчеты излучения [OI] 630 и 557.7 нм, приведенные в [Rassoul et al., 1993], также показывают, что для красных полярных сияний с $I_{630}/I_{557.7} \sim 4$ требуются электроны с энергиями ~ 0.01 – 10 кэВ.

Эти обстоятельства делают обоснованным поиск иных механизмов квазиселективного заселения уровней ${}^1\text{D}$ атомов кислорода на высотах области F2 и/или поступления дополнительных порций кислорода из плазмосферы или магнитосферы.

В работе [Rassoul et al., 1993] дается номенклатура нескольких типов низко- и среднеширотных сияний, среди которых для нас представляют интерес два типа: 1) тип d, связанный с возбуждением доминирующей эмиссии 630 нм электронами с энергиями ~ 10 – 1000 эВ (с $I_{630}/I_{557.7} \sim 1$ – 10); 2) НР-сияния (Heavy Particle aurora), вызванные тяжелыми частицами с энергиями ~ 1 – 100 кэВ и связанные с высыпанием нейтральных атомов и ионов. При этом доминирующей эмиссией для НР-сияний указано только излучение первой отрицательной системы 1N_2^+ . Тип d среднеширотных сияний может включать сияния, приведенные на рис. 1 настоящей работы.

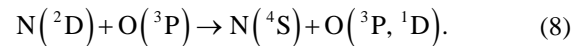
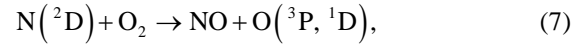
Возможные механизмы и реакции селективного усиления I_{630} в среднеширотных сияниях

Для НР-сияний в работах [Mahadevan, Roach, 1968; Solomon et al., 1988] приводится одна из возможных реакций, способствующих селективному заселению уровня $\text{O}({}^1\text{D})$:



Данная реакция является реакцией резонансной перезарядки ионов кислорода на атомах кислорода с образованием возбужденного атома O^* в состоянии ${}^1\text{D}$. Авторы отмечают, что выход $\text{O}({}^1\text{D})$ в реакции (6) неизвестен, но, вероятно, он незначителен, за исключением очень больших (~ 400 км) высот.

В недавней работе [Дашкевич, Иванов, 2022] для высот 100–300 км рассматриваются известные потенциальные источники возбуждения ${}^1\text{D}$ терма атомарного кислорода в полярных сияниях, среди которых для нас могут представлять интерес реакции с возбужденными компонентами нечетного азота:



Для этих реакций также выполняется селективное заселение ${}^1\text{D}$ терма по отношению к ${}^1\text{S}$.

В работе [Гогошева, 1979] было показано, что в магнитно-возмущенные периоды реакция (8) может обеспечивать почти половину наблюдаемой интенсивности эмиссии [OI] 630 нм. Диссоциативная рекомбинация $\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N}({}^2\text{D}) + \text{O}({}^3\text{P})$ ночью является основным источником азота в метастабильном состоянии $\text{N}({}^2\text{D})$, который может быть достаточно эффективным источником возбужденных атомов $\text{O}({}^1\text{D})$. Кроме того, метастабильное состояние $\text{N}({}^2\text{D})$ является верхним уровнем перехода в основное состояние, при котором излучается дуплет атомного азота 519.99–520.23 нм (эмиссия 520 нм). В средних широтах в спокойных геомагнитных условиях интенсивность эмиссии 520 нм достаточно низкая: ~ 0.5 – 3 Рл. В условиях же геомагнитной активности для ряда геомагнитных бурь эмиссия 520 нм может существенно усиливаться [Tinsley et al., 1986; Михалев и др., 2018] (см. рис. 3), что может служить указанием на увеличение заселенности уровня $\text{N}({}^2\text{D})$ и, соответственно, выхода кислорода $\text{O}({}^3\text{P}, {}^1\text{D})$ в реакциях (7)–(8). В частности, можно указать на реакцию, являющуюся основным источником NO^+ в ночных условиях в F-области ионосферы:



Согласно [Гогошева, 1979], коэффициент этой реакции зависит от колебательной температуры N_2 и повышается на порядок при повышении температуры до 3000 К.

Общим в левых частях уравнений (6) и (8), (9) являются атомы и ионы кислорода. Будет уместным напомнить результаты спектрометрии полярного сияния 10/11 февраля 1958 г. в работе [Wallace, 1960]. Спектры показали аномальное усиление интенсивностей эмиссий атомарного кислорода [OI] 777.4 и 844.6 нм по сравнению с обычными сияниями и появление интенсивных эмиссий иона кислорода [OII] 731.9 и 733.0 нм, нетипичных для обычных полярных сияний. Эмиссии [OII] 731.9 и 733.0 нм с некоторой степенью достоверности (на фоне полосы гидроксила OH (8-3)) можно выделить и в среднеширотном сиянии 17 марта 2015. На рис. 3 приведены фрагменты спектра в диапазонах длин волн 500–600 [Михалев и др., 2018] и 700–760 нм, зареги-

стрированного во время магнитной бури 17 марта 2015 г. спектрографом Shamrock SR-303I.

Таким образом, можно выделить некоторые характеристики среднеширотных сияний 11 февраля 1958 г. и 17 марта 2015 г.: высокие значения интенсивностей [OI] 630 нм при слабо развитом кольцевом токе, приводящие к отсутствию зависимости от *Dst*-индекса; сходство общей динамики интенсивности эмиссии 630 нм, коррелирующей с суббуревыми активизациями и суббурями; высокое отношение $I_{630}/I_{557.7}$; наличие спектральных линий атомов и ионов кислорода. Различие сравниваемых бурь заключается в количественном выражении указанных характеристик.

Следует упомянуть еще о двух свойствах сияний типа great aurora — большая широтная протяженность и появление на интенсивном красном фоне светлых столбов [Kataoka et al., 2019]. Большая широтная протяженность сияний может быть обеспечена каскадной реакцией перезарядки тяжелых частиц, когда ионы кольцевого тока с энергиями десятки кэВ при начальном изотропном пичч-угловом распределении теряются в процессах перезарядки при столкновениях с атомами верхней атмосферы (внешней плазмосферы). При этом образуются энергичные нейтралы с энергиями десятки кэВ, которые не управляются магнитным полем и высыпаются в термосферу, вступая там в многочисленные реакции перезарядки. Светлые столбы требуют отдельного рассмотрения. Отдельного рассмотрения требуют также типы крупномасштабных структур солнечного ветра, приводящих к различиям в динамике магнитных бурь (см., например, [Дремухина и др., 2020]) и, соответственно, в характеристиках экстремальных сияний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Учитывая важную роль магнитосферно-ионосферных токовых систем в формировании геомагнитных бурь и суббурь, а также оптические и спектральные особенности среднеширотного сияния 11 февраля 1958 г., можно предварительно сформулировать некоторые условия формирования и признаки полярных сияний типа great aurora.

1. Высокие интенсивности сияний типа great aurora с доминирующей эмиссией [OI] 630 нм, или по крайней мере части из них, наблюдаются во время интенсивных суббурь и связаны, вероятно, с образованием локальных ионосферно-магнитосферных токовых систем. В этом их отличие от среднеширотных сияний, наблюдаемых во время больших мировых магнитных бурь, для которых характерна зависимость от симметричного кольцевого тока и, следовательно, *Dst*-индекса.

2. Существование долготной асимметрии в магнитном отклике *H*-компоненты на магнитосферные суббури, обусловленной формированием системы ионосферно-магнитосферных токов в узких секторах местного времени, позволяет предположить, что great aurora возникают и наблюдаются в ограниченном долготном секторе на главных фазах магнитных бурь.

3. Высокое отношение интенсивностей эмиссий атомарного кислорода $I_{630}/I_{557.7} \sim 10^3 - 10^4$ может указывать на механизм селективного заселения уровня [OI] 1D , в котором, в частности, могут быть реализованы реакции резонансной перезарядки ионов кислорода кольцевого тока с образованием возбужденного атома [OI] 1D и/или реакции столкновений атомов и молекул кислорода с возбужденными компонентами нечетного азота.

4. В спектрах great aurora могут наблюдаться интенсивные спектральные линии атомов [OI] 777.4 и 844.6 нм и ионов [OII] 731.9 и 733.0 нм кислорода.

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

- Гогошева Ц. Вклад $N(^2D)$ в возбуждение красной кислородной эмиссии. *Бюл. геофиз. списание*. 1979. Т. 5, № 1. С. 33–35.
- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор). *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 5. С. 1–33.
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Анализ источников эмиссии 630.0 нм в полярных сияниях. *Космические исследования*. 2022. Т. 60, № 5. С. 368–376.
- Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Различия в динамике асимметричной части магнитного возмущения в периоды магнитных бурь, индуцированных разными межпланетными источниками. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2020. Т. 60, № 6. С. 727–739. DOI: [10.31857/S0016794020060036](https://doi.org/10.31857/S0016794020060036).
- Евлашин Л.С. Выдающееся полярное сияние 11/II 1958 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1962. Т. 2, № 1. С. 74–78.
- Золотухина Н.А., Полех Н.М., Михалев А.В. и др. Особенности эмиссий 630.0 и 557.7 нм в области главного ионосферного провала: 17 марта 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 57–71. DOI: [10.12737/szf-7320105](https://doi.org/10.12737/szf-7320105).
- Иевенко И.Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмопаузы. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2022. Т. 62, № 2. С. 171–188. DOI: [10.31857/S0016794022020092](https://doi.org/10.31857/S0016794022020092).
- Михалев А.В. Среднеширотные сияния в Восточной Сибири в 1991–2012 гг. *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 24. С. 78–83.
- Михалев А.В. Среднеширотные сияния в 23–24-м солнечных циклах по данным наблюдений на юге Восточной Сибири. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 80–89. DOI: [10.12737/szf-54201909](https://doi.org/10.12737/szf-54201909).
- 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).
- Николаев А.В. Исследование токовой системы суббури по данным спутниковых измерений: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.03.03. СПб., 2015. 150 с.
- Трутце Ю.Л. Верхняя атмосфера во время геомагнитных возмущений. *Полярные сияния и свечения ночного неба*. М.: Наука, 1973. № 20. С. 5–22.
- 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 аэронаука*. 2009. Т. 49, № 2. С. 163–173.

- Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М. О поведении эмиссии H_I 656.3 нм и [OI] 630 нм верхней атмосферы во время магнитных бурь с внезапным началом. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. Т. 25, № 3. С. 509–511.
- Шефов Н.Н., Юрченко О.Т. Абсолютные интенсивности эмиссий полярных сияний, наблюдавшихся в Звенигороде. *Полярные сияния и свечение ночного неба*. 1970. № 18. С. 50–96.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- Шуйская Ф.К. Наблюдение полярного сияния 11.II. 1958 г. на ст. Рощина. *Полярные сияния и свечение ночного неба*. М.: Наука, 1967. № 13. С. 87–97.
- Akasofu S.-I. The dynamic aurora. *Scientific American*. 1989. Vol. 260, iss. 5. P. 90–97.
- Akasofu S.-I. Relationship between geomagnetic storms and auroral/magnetospheric substorms: Early studies. Review. *Front. Astron. Space Sci. Sec. Space Phys.* 2020. Vol. 7. P. 1–16. DOI: [10.3389/fspas.2020.604755](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.604755).
- Akasofu S., Chapman S. Large-scale auroral motions and polar magnetic disturbances – III: The aurora and magnetic storm of 11 February 1958. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1962. Vol. 24. P. 785–796. DOI: [10.1016/0021-9169\(62\)90199-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(62)90199-X).
- Berrilli F., Giovannelli L. The great aurora of 4 February 1872 observed by Angelo Secchi in Rome. *J. Space Weather Space Clim.* 2022. Vol. 12, 3. DOI: [10.1051/swsc/2021046](https://doi.org/10.1051/swsc/2021046).
- Dmitriev A., Yeh H.-C. Storm-time ionization enhancements at the topside low-latitude ionosphere. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 867–876.
- Hikosaka T. On the great enhancement of the line [OI] 6300 in the aurora at Niigata on February 11, 1958. *Rep. Ionosp. Res. Japan*. 1958. Vol. 12, no. 4. P. 469–471.
- 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 Clim.* 2019. Vol. 9, 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 Clim.* 2021. Vol. 11, 29. DOI: [10.1051/swsc/2021011](https://doi.org/10.1051/swsc/2021011).
- Mahadevan P., Roach F.E. Mechanism for the auroral emission of OI (6300 Å). *Nature*. 1968. Vol. 220. P. 150–152. DOI: [10.1038/220150B0](https://doi.org/10.1038/220150B0).
- Manring E.R., Pettit H.B. Photometric observations of the 5577 Å and 6300 Å emissions made during the aurora of February 10–11, 1958. *J. Geophys. Res.* 1959. Vol. 64, no. 2. P. 149–153. DOI: [10.1029/JZ064i002p00149](https://doi.org/10.1029/JZ064i002p00149).
- Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A. Low-latitude particle precipitation and associated local magnetic disturbance. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, iss. A4. P. 4041–4052. DOI: [10.1029/91JA03028](https://doi.org/10.1029/91JA03028).
- 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. DOI: [10.1029/92JA02269](https://doi.org/10.1029/92JA02269).
- Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. I. Model computations. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, iss. 34. P. 5181–5186.
- Saiz E., Cid C., Guerrero A. The relevance of local magnetic records when using extreme space weather events as benchmarks. *J. Space Weather Space Clim.* 2021. Vol. 11, 35. DOI: [10.1051/swsc/2021018](https://doi.org/10.1051/swsc/2021018).
- Sergeev V.A., Tsyganenko N.A., Smirnov M.V., et al. Magnetic effects of the substorm current wedge in a “spread-out wire” model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, A07218. DOI: [10.1029/2011JA16471](https://doi.org/10.1029/2011JA16471).
- Shiokawa K., Ogawa T., Kamide Y. Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A5, A05202. DOI: [10.1029/2004JA010706](https://doi.org/10.1029/2004JA010706).
- Shiokawa K., Miyoshi Y., Brandt P.C., et al. Ground and satellite observations of low-latitude red auroras at the initial phase of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118, no. 1. P. 256–270. DOI: [10.1029/2012JA018001](https://doi.org/10.1029/2012JA018001).
- Solomon S.C., Hays P.B., Abreu V.J. The auroral 6300 Å emission: Observations and modeling. *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93, no. A9. P. 9867–9882.
- Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H., et al. Low-latitude aurorae and storm time current systems. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, iss. A10. P. 11257–11269. DOI: [10.1029/JA091iA10p11257](https://doi.org/10.1029/JA091iA10p11257).
- Vallance J.A. Historical review of great aurora. *Can. J. Phys.* 1992. Vol. 70, iss. 7. P. 479–487. DOI: [10.1139/p92-083](https://doi.org/10.1139/p92-083).
- Wallace L. An analysis of spectrogram of the red aurora of February, 1958, in the wavelength range. *Can. J. Phys.* 1960. Vol. 38, no. 3. P. 453–457. DOI: [10.1016/0021-9169\(59\)90142-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(59)90142-4).
URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html (дата обращения 25 января 2024 г.).
- URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 25 января 2024 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Михалев А.В. Полярные сияния в периоды экстремальных геомагнитных бурь: особенности среднеширотного сияния 11 февраля 1958 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 60–66. DOI: [10.12737/szf-102202406](https://doi.org/10.12737/szf-102202406).