

КАКИЕ ШИРОТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МОГУТ БЫТЬ ПОДВЕРЖЕНЫ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ?

WHICH LATITUDES OF THE RUSSIAN FEDERATION MAY BE AFFECTED BY EXTREME MAGNETIC STORMS?

Н.В. Савельева

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, nasa2000@ya.ru
Геофизический центр РАН,
Москва, Россия*

В.А. Пилипенко 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru
Геофизический центр РАН,
Москва, Россия*

О.И. Ягодкина

*Полярный геофизический институт КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, yagodkina@pgia.ru*

N.V. Savelyeva

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, nasa2000@ya.ru
Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia*

V.A. Pilipenko

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru
Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia*

O.I. Yagodkina

*Polar Geophysical Institute KSC RAS,
Apatity, Russia, yagodkina@pgia.ru*

Аннотация. Если рассматривать авроральный овал как индикатор положения электроджета, то информация о положении экваториальной границы овала позволяет предсказать, на каких широтах могут наблюдаться наиболее интенсивные вариации геомагнитного поля. Эти вариации являются источником геоиндуцированных токов (ГИТ), представляющих угрозу стабильной работе электроэнергетических систем. Для оценки возможной минимальной широты аврорального овала широко используются модели Старкова-93 (С93), Auroral Precipitation Model (APM), и OVATION Prime (OP). Однако базы данных, на основе которых строились эти модели, не включали редкие экстремальные магнитные бури ($|Dst| > 400$ нТл). Оценка минимальной широты экваториальной границы дискретных сияний во время экстремальных бурь предлагает статистическая модель L2025, основанная на свидетельствах очевидцев. Экстраполяция зависимости широты экваториальной границы овала от интенсивности бури моделей С93 и APM при экстремальных возмущениях ($|Dst| > 400$ нТл) расходятся с предсказаниями модели L2025. В новой версии модели распределения авроральных высыпаний APM_GEO были сняты ограничения на уровень магнитной активности по индексам AL и Dst , что дает возможность оценить положение границы высыпаний в периоды суперсуббурь и экстремальных бурь. С целью сопоставления моделей OP и APM_GEO рассмотрена динамика аврорального овала во время бури 10–11 мая 2024 г. согласно каждой модели и для территории Российской Федерации построены карты экваториальных границ овала для различных фаз бури. Сопоставление показало, что модель OP, управляемая параметрами межпланетной среды, существенно недооценивает широтное смещение овала по сравнению с моделью

Abstract. If we consider the auroral oval as an indicator of the electrojet position, the information about the position of its equatorial boundary allows us to predict the latitudes at which the most intense geomagnetic variations can be observed. These variations are the source of geomagnetically induced currents (GICs), which pose a threat to the stable operation of electric power systems. The Starkov-93 (S93) model, Auroral Precipitation Model (APM), and OVATION Prime (OP) model are widely used to estimate the possible minimum latitude of the oval. However, the databases with the aid of which these models were built did not contain rare extreme magnetic storms ($|Dst| > 400$ nT). As a source of information on auroral latitudes during extreme storms, we employ the statistical model of the minimum latitude of the equatorial boundary of discrete auroras L2025, which is based on observational evidence. Extrapolation of the dependences of the oval's equatorial boundary latitude on the storm intensity obtained by the S93 model and APM during extreme storms ($|Dst| > 400$ nT) diverge from the predictions of the L2025 model. In the new version of APM (APM_GEO), the limitations to the magnetic activity level in the AL and Dst indices were removed, which makes it possible to estimate the location of the precipitation boundary during super substorms and extreme storms. To compare the OP model with APM_GEO, we have examined the dynamics of the auroral oval during the May 10–11, 2024 magnetic storm and have constructed maps of the position of the oval equatorial boundaries for different storm phases for the territory of the Russian Federation. As revealed from the comparison with APM_GEO, the OP model driven by interplanetary medium parameters significantly underestimates latitudinal shift of the oval. Since intense substorms during storms lead to a significant equatorial shift of the oval

APM_GEO. Поскольку интенсивные суббури во время бурь приводят к значительному экваториальному смещению границы овала, то все крупные энергетические сети Российской Федерации могут быть подвержены влиянию ГИТ не только при экстремальных, но и при сильных магнитных бурях при наличии на их фоне интенсивных суббурь.

Ключевые слова: космическая погода, магнитные бури, геоиндуцированные токи, авроральный овал.

ВВЕДЕНИЕ

По иронии судьбы чем к более красочным и завораживающим полярным сияниям приводят магнитные бури, тем большую опасность они представляют для спутниковых и наземных технологических систем. Сильные бури активизируют потоки релятивистских электронов в радиационном поясе, нарушающие работу спутниковой электроники [Effects of Space Weather..., 2004; Pilipenko et al., 2006], создают помехи сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Ясюкевич и др., 2013], искажают результаты инклинометрических измерений при наклонно направленном бурении глубоких скважин [Гвишиани, Лукьянова, 2018], вызывают перегрузки при передаче электроэнергии [Baker et al., 2008; Hargood, 2012; Пилипенко, 2021], приводят к сбоям железнодорожной сигнализации [Пилипенко и др., 2023а, б], сокращают срок службы трубопроводного транспорта [Костарев и др., 2023]. Основным источником наземных геомагнитных возмущений являются вариации аврорального электроджета, которые генерируют геоэлектрические поля, являющиеся драйверами геоиндуцированных токов (ГИТ) в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) [Boteler, 2003; Dimmock et al., 2019; Kozuyeva et al., 2018]. Авроральный электроджет сосредоточен в авроральном овале [Feldstein et al., 1999; Walker et al., 2024]. В спокойные геомагнитные периоды ночная экваториальная граница овала полярных сияний находится в области до $\sim 70^\circ$ геомагнитной широты, но после начала магнитной бури овал расширяется и его экваториальная граница опускается до более низких широт. С расширением овала возрастают интенсивность геомагнитных возмущений и сила возбуждаемых ими ГИТ на средних широтах [Kataoka, Ngwira, 2016; Woodroffe et al., 2016].

Авроральный овал является также областью с высокой ионосферной турбулентностью. Для этой области характерно наличие резких градиентов ионосферной плазмы, что провоцирует потери фазы сигналов и существенно снижает устойчивость ГНСС GPS/ГЛОНАСС [Edemskiy, Yasyukevich, 2022]. При магнитных бурях зона с неустойчивым приемом сигналов ГНСС значительно расширяется.

Широта экваториальной границы овала полярных сияний является одним из ключевых параметров космической погоды. Динамика аврорального овала при сильных и экстремальных бурях, как правило, тесно связана с динамикой основных магнитосферных структур. Положение аврорального овала важно для адекватного описания динамики внешнего радиационного пояса Земли [Мягкова и др., 2010;

boundary, all large energy grids of the be affected by GICs not only during extreme, but also during strong magnetic storms in the presence of intense substorms against their background.

Keywords: space weather, magnetic storms, geomagnetically induced currents, auroral oval.

Тверская, 2011]. К экваториальной границе овала привязан максимум в широтном распределении мощности ультранизкочастотных волн диапазона Pc5 [Kozuyeva et al., 2016]. В связи с этим космофизическое сообщество прилагает немало усилий для построения моделей, позволяющих предсказать положение аврорального овала.

Первые модели аврорального овала были основаны на наземных фотографических наблюдениях полярных сияний [Хорошева, 1961; Фельдштейн, 1963]. Несмотря на простоту таких моделей, модель [Старков, 1993, 1994] (далее С93) до сих пор успешно используется в космической геофизике [Тверская, 2011]. Предпринимались усилия для построения модели овала по его УФ-свечению, регистрируемому на высокоэллиптических спутниках [Carbury et al., 2003; Chisham et al., 2022], однако период таких наблюдений был непродолжительным. Возможно восстановление широтного профиля аврорального электроджета по наземным геомагнитным данным, но для этого требуется плотная меридиональная сеть станций [Johnsen, 2013; Evdokimova, Petrukovich, 2020]. Делаются также попытки построить модель аврорального овала по данным о продольных токах вдоль геомагнитного поля, регистрируемых магнитометрами низкоорбитальных спутников [Gary et al., 1998; Xiong et al., 2014].

Одним из наиболее надежных методов определения границ овала полярных сияний является регистрация потоков заряженных частиц на низкоорбитальных спутниках, которая позволяет идентифицировать как ионосферные проекции пограничных областей магнитосферы, так и сам авроральный овал. На основе многолетних данных низкоорбитальных космических аппаратов серии DMSP построена статистическая модель OVATION Prime (OP), параметризованная по межпланетным данным [Sotirelis, Newell, 2000; Newell et al., 2014]. Подобная модель, параметризованная по геомагнитным индексам Dst и AL , — Aurora Precipitation Model (APM, а также новая версия APM_GEO) — была построена в Полярном геофизическом институте [Vorobjev et al., 2013; Воробьев и др., 2023].

Базы данных наблюдений, на основе которых были построены перечисленные выше модели, включали сильные магнитные бури с $|Dst| \sim 200$ нТл, однако экстремальных событий в период инструментальных наблюдений не было. Поэтому неизвестно, можно ли полученные модели экстраполировать на случай экстремальных магнитных бурь с $|Dst| > 400$ нТл. С целью собрать информацию о широтах полярных сияний во время экстремальных событий космической погоды Blake et al. [2021] и Love et al. [2025] изучили опубли-

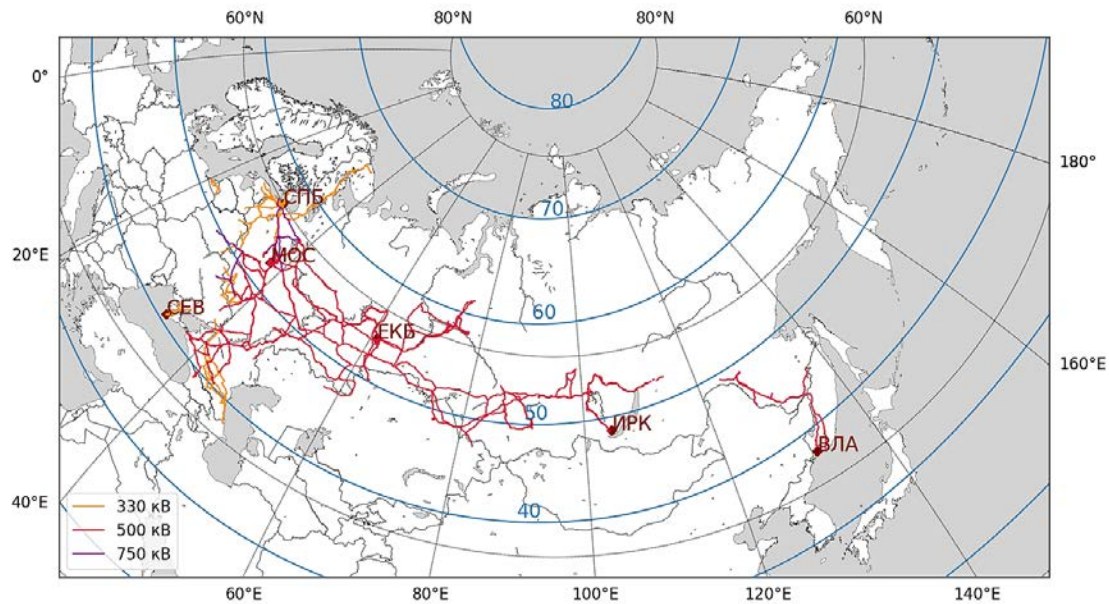


Рис. 1. Карта основных энергетических линий РФ с некоторыми промышленными центрами. Синими линиями показаны геомагнитные широты, серыми пунктирными — географические. Магнитные координаты рассчитаны по модели AACGC на 10 мая 2024 г. для высоты 100 км

кованные в прессе сведения о визуальных наблюдениях полярных сияний. Был составлен список самых низких широт, на которых в местном зените наблюдались дискретные полярные сияния для каждой бури, и на этой основе была построена статистическая модель (далее L2025) широты экваториальной границы овала в зависимости от интенсивности бури, характеризующейся Dst -индексом. Несмотря на очевидную ограниченность такой модели, она позволяет хотя бы грубо оценить положение границы овала при экстремальных бурях.

Наблюдения полярных сияний представляют не только академический интерес, но и являются полезным диагностическим средством для выявления зон потенциально опасных геомагнитных возмущений [Воробьев и др., 2018; Zou et al., 2022] вследствие связи полярных сияний с авроральным электроджетом. Авроральным электроджетом создаются наибольшие по величине возмущения геомагнитного поля на земной поверхности, однако наиболее сильные всплески ГИТ связаны с быстрыми пульсациями типа P13 (характерные периоды — первые десятки минут) с высокими значениями производной dB/dt [Pilipenko et al., 2024]. Эти пульсации по существу являются тонкой структурой аврорального овала и могут сопровождаться локальным уярчением полярных сияний [Apatenkov et al., 2020].

В Российской Федерации высоковольтные ЛЭП сосредоточены в европейской части и вытянуты на восток в южной части (рис. 1). Поскольку эти ЛЭП, за исключением линии «Северный транзит», идущей вдоль Кольского п-ова, находятся на более низких геомагнитных широтах, чем авроральная область, то, казалось бы, магнитные бури не представляют опасности для энергетической системы РФ. Однако при сильных бурях границы овала полярных сияний и, соответственно, интенсивные вариации

геомагнитного поля смещаются к югу. Могут ли такие бури представлять опасность для энергосистемы РФ и если могут, то какой интенсивности?

В данной работе мы построили карту рисков для энергетических и навигационных систем на территории РФ, обусловленных сильными бурями и суббурями в ночном секторе на геомагнитном меридиане Москвы 37° N, для экстремальных значений Dst - и AL -индексов согласно моделям C93, APM, APM_GEO, OP и L2025. Для космической геофизики сопоставление результатов различных моделей интересно тем, что позволяет понять, могут ли эти модели быть экстраполированы на случай экстремальных возмущений. Конечная цель работы состоит в том, чтобы наметить подходы к оперативной оценке рисков в работе техногенных объектов на территории РФ, которые могут возникнуть во время магнитных бурь и суббурь.

МОДЕЛИ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Модель C93

Старковым [1994] были систематизированы положения экваториальной границы полярных сияний в зависимости от AL -индекса и локального магнитного времени (MLT) по данным фотографических наблюдений на авроральных широтах, полученных разными исследователями. Им же предложены формулы для определения границ аврорального овала в зависимости от AL -индекса, который характеризует интенсивность суббурь. Эмпирическая зависимость максимально низкой геомагнитной широты дискретных форм полярных сияний в зените в околополночные часы от интенсивности магнитной бури $\Phi(Dst)$ аппроксимируется соотношением [Старков, 1993]

$$\Phi = 74.9^\circ - 8.6 \lg |Dst|. \quad (1)$$

Это соотношение в дальнейшем проверялось и было подтверждено в работе [Зверев и др., 2012].

Модель OVATION Prime

Источником детальной и почти непрерывной информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков электронов, вызывающих полярные сияния. Данные регистрации потоков частиц на спутниках не зависят от освещенности ионосферы и облачности, доступны для обоих полушарий, более достоверны и точны, чем наземные или спутниковые оптические наблюдения полярных сияний. Модель аврорального овала OVATION Prime (OP) основана на данных более чем двадцати лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках DMSP (высота ~800 км). Модель OP [Newell et al., 2010] позволяет предсказать поток энергии, поток числа частиц и среднюю энергию высыпавшихся электронов и ионов на геомагнитных широтах выше 50°. Модель параметризована по значениям параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) из базы данных OMNI и позволяет рассчитать с временным разрешением 1 ч ожидаемое двумерное пространственное распределение интенсивности основных типов высыпаний авроральных электронов и ионов [Newell et al., 2009]. За границу дискретных сияний принимается граница высыпаний мягких низкоэнергичных электронов (0.1–10 кэВ). В модели OP использована ранее установленная статистическая связь между параметрами межпланетной среды и динамикой потоков авроральных частиц [Newell et al., 2007]. Модель OP дает возможность предсказывать с горизонтом ~1 ч положение и интенсивность аврорального овала по данным в реальном времени со спутников, находящихся в точке либрации.

Техническая трудность при использовании этой модели для прошедших событий связана с тем, что для сопоставления результатов моделирования с Dst -индексом необходимо иметь эмпирическую модель связи межпланетных параметров с геомагнитными индексами. Хотя эти связи определялись статистически [Pallochchia et al., 2006; Voroyev et al., 2020], однако для экстремальных событий они неизвестны.

Модель APM

Auroral Precipitation Model (APM) [<http://apm.pgia.ru/data>] для границ авроральных высыпаний построена по данным спутников DMSP F6 и F7 и параметризована по геомагнитным индексам Dst и AL . База данных содержит результаты более 30 000 пролетов спутников DMSP в Северном и Южном полушариях в 1986 г. В этот период происходили бури с $|Dst| < 200$ нТл и суббури с $|AL| < 1500$ нТл. Важная особенность APM заключается в том, что использование двух индексов (хотя они не полностью независимы) позволяет рассматривать в рамках этой модели такие ситуации, как магнитная буря без суббури и суббуря без магнитной бури. APM дает планетарное распределение границ высыпаний разного типа в исправленных геомагнитных (CGL-MLT) и географических координатах, а также зна-

чения потоков энергии и средней энергии вторгающихся частиц в зависимости от уровня геомагнитной активности. Авроральные области с различными характеристиками высыпавшихся частиц классифицируются следующим образом: DAZ (diffuse auroral zone) — область диффузных высыпаний к экватору от овала, совпадающая с зоной диффузных полярных сияний; AOP (auroral oval precipitation) — область структурированных высыпаний, экваториальная граница которой совпадает с экваториальной границей овала дискретных форм полярных сияний; SDP (soft diffuse precipitation) — область мягких диффузных высыпаний к полюсу от AOP [Воробьев, Ягодкина, 2005]. В околополуночные часы экваториальная граница электроджета может быть достаточно хорошо аппроксимирована положением экваториальной границы зоны структурированных авроральных высыпаний (AOP) [Воробьев и др., 2018]. Геомагнитная широта экваториальной границы области AOP в ночном секторе (21–24 MLT) аппроксимируется формулой [Воробьев, Ягодкина, 2007]

$$\Phi = 66.66 - 0.0092|AL| + 7.78 \cdot 10^{-7} AL^2 - 0.022|Dst|. \quad (2)$$

Однако использованные в этой модели аппроксимации ограничены значениями $|AL| < 1500$ нТл, $|Dst| < 200$ нТл. При больших значениях $|AL|$ -индекса APM выдает нереалистичную форму овала (типа восьмерки).

Новая версия APM_GEO, разработанная для Северного полушария [Воробьев и др., 2023], представлена на сайте ПГИ [<https://pgia.ru/data/spaceweather/>]. В APM_GEO мелкая регулярная сетка по MLT задается с помощью интерполяции полиномом Лагранжа по исходным значениям. Благодаря такой детальной интерполяции APM GEO избавлена от недостатка прежней версии — искажения формы овала в утреннем и вечернем секторах при больших значениях AL . Модель выдает для заданных геомагнитных индексов распределение интенсивностей потоков в зонах высыпаний и позволяет рассчитать кривые кривые, показывающие границы зон высыпаний как в географических, так и в геомагнитных координатах. В APM_GEO сняты ограничения на уровень магнитной активности по AL - и Dst -индексам, что дает возможность примерно оценить положение и характеристики высыпаний в периоды суперсуббури и экстремальных магнитных бурь.

Эмпирическая зависимость L2025

Как мы уже упоминали, Love et al. [2025] в качестве источника информации о широтах полярных сияний во время экстремальных бурь использовали опубликованные в журналах и газетах свидетельства очевидцев полярных сияний. Большинство таких сообщений касались наиболее ярких дискретных полярных сияний, наблюдавшихся в ночные часы. На этой основе была построена статистическая модель L2025 минимальной широты экваториальной границы дискретных полярных сияний в зависимости от Dst -индекса. Собранный архив наблюдений включает магнитные бури с интенсивностью $|Dst| > 200$ нТл.

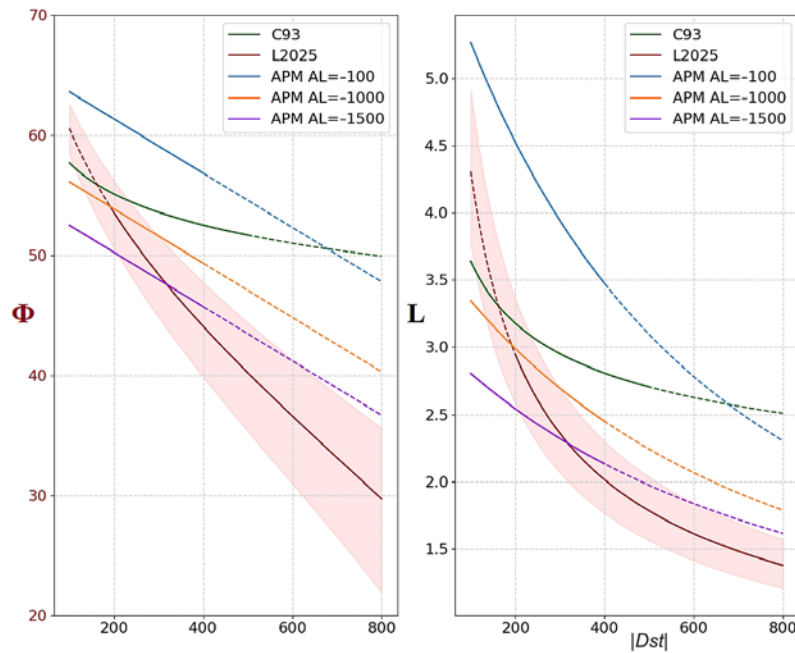


Рис. 2. Геомагнитная широта Φ (а) и L -оболочка (б) экваториальной границы аврорального овала в околополуночные часы (MLT=21–24) в зависимости от значений $|Dst|$ по моделям C93 (зеленая линия), L2025 (коричневая линия) и АРМ для случаев бури без суббури ($AL=-100$ нТл) (синяя линия) и с суббурями $AL=-1000$ (оранжевая линия) и $AL=-1500$ нТл (фиолетовая линия). Штрихами показаны экстраполяции вне интервала формальной применимости моделей

В частности, в подборку вошли экстремальные бури и суперсуббури 2 сентября 1859 г. ($|Dst|=964$ нТл), 4 февраля 1872 г. ($|Dst|=801$ нТл), 15 мая 1921 г. ($|Dst|=907$ нТл) и др. Регрессионная связь $|Dst|$ -индекса и параметра магнитной оболочки экваториальной границы полярных сияний L была определена в виде

$$\ln L = 3.9825 - 0.5478 \ln |Dst|. \quad (3)$$

Дисперсия оценки (3) растет по мере увеличения $|Dst|$ из-за малого числа экстремальных событий.

Очевидно, что модель L2025 построена не на самых надежных данных: нет уверенности, что все наблюдения относятся к сияниям в зените и в ночном (21–24 MLT) секторе, свечение аврорального овала может быть спутано со свечением красной дуги на более низких широтах, для давних событий геомагнитные индексы оценены весьма приблизительно и т. п. Принципиальная ограниченность этой модели состоит в том, что в ней не выделяется явно роль авроральной активности, характеризуемой AL -индексом, что может сказаться на корректности определения экваториальной границы аврорального овала. Поскольку для прошлых экстремальных магнитных бурь AL -индекс неизвестен, возникают сомнения в том, что широта наблюдаемого полярного сияния определялась только Dst -индексом.

ВОЗМОЖНЫЕ ШИРОТЫ ГРАНИЦЫ ОВАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ БУРИ

Для сопоставления моделей L2025, АРМ, C93 построены графики зависимости геомагнитной ши-

роты $\Phi(|Dst|)$ и магнитной оболочки $L(|Dst|)$ для ночного (21–24 MLT) сектора (рис. 2). Параметр магнитной оболочки L (безразмерное расстояние до вершины силовой линии в радиусах Земли $r=LR_E$) рассчитывался из соотношения $\cos^2 \Phi = (R_E + h) / LR_E$, где Φ — геомагнитная широта, $R_E = 6370$ км, $h = 250$ км — высота красного аврорального свечения. При $R_E \gg h$ отсюда получается хорошо известное соотношение $\cos \Phi = 1 / \sqrt{L}$.

Модели C93 и АРМ имеют ограничения по уровню магнитной активности, поэтому мы экстраполируем зависимости (1), (2) на бури экстремальной интенсивности вплоть до $|Dst| \sim 800$ нТл. Зависимость (3), используемую в модели L2025, мы, напротив, экстраполируем в область значений $|Dst| < 200$ нТл. На рис. 2 эти участки кривых показаны штрихами. Аппроксимационная формула АРМ для ночного сектора (2) использована для оценки экваториальной границы овала при возмущениях типов «буря без суббури» ($|AL|=100$ нТл), «буря с умеренной суббури» ($|AL|=1000$ нТл) и «буря с сильной суббури» ($|AL|=1500$ нТл). Нас интересует, согласуются ли результаты экстраполяции зависимостей (1) и (2) моделей C93 и АРМ на экстремальные величины геомагнитных возмущений с зависимостью (3) модели L2025. Для умеренных бурь ($|Dst| \sim 200$ нТл) АРМ дает $\Phi \sim 55^\circ$, что близко к $\Phi \sim 54^\circ$ по модели L2025. Широты $\Phi \sim 54^\circ$ соответствуют L -оболочке ~ 3.2 .

Для более мощных бурь зависимости начинают расходиться. Например, для бури с $|Dst|=600$ нТл расхождение становится значительным: C93 и АРМ ($|AL|=100$ нТл) дают $\Phi \sim 52^\circ$, в то время как по L2025 широта границы составляет $\Phi \sim 36^\circ$. Для экстремальных бурь модель C93 дает заведомо нереальные ре-

Город	Код	Географическая широта	Географическая долгота	Геомагнитная широта	Геомагнитная долгота	L-оболочка
Санкт-Петербург	СПБ	59.9	30.3	56.1	107.0	3.3
Москва	МОС	55.8	37.6	51.7	112.2	2.7
Екатеринбург	ЕКБ	56.9	60.6	52.7	133.9	2.8
Иркутск	ИРК	52.3	104.3	47.4	177.1	2.2
Севастополь	СЕВ	44.6	33.5	39.7	106.3	1.7
Владивосток	ВЛА	43.1	131.9	37.2	206.1	1.6

Рассчитано с помощью [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html], эпоха 2000.

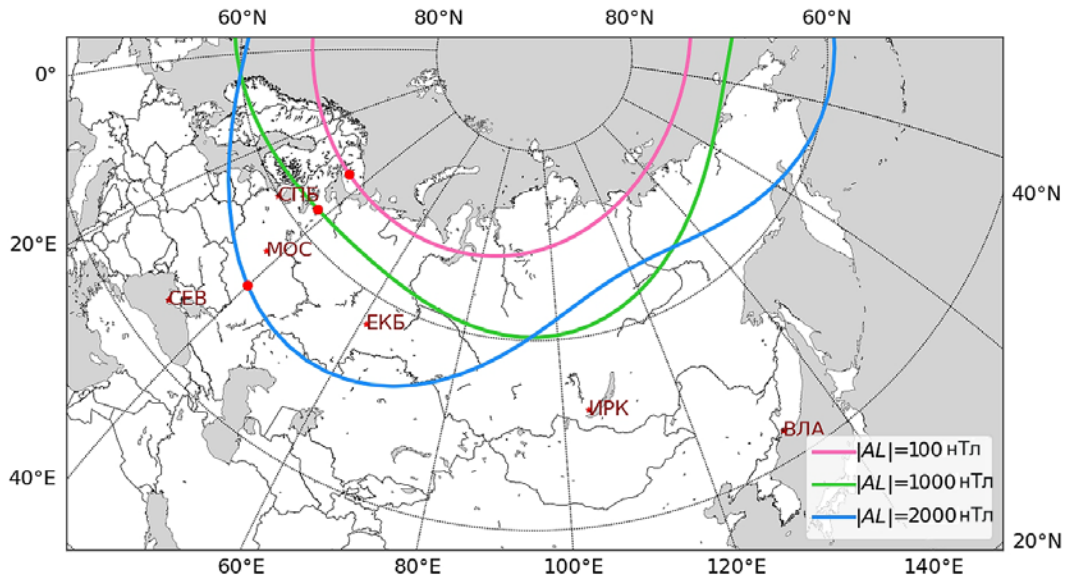


Рис. 3. Географическое положение экваториальной границы аврорального овала для территории РФ для суббурь разной интенсивности согласно модели C93. Полночь на меридиане Москвы отмечена красными точками

зультаты, что естественно, поскольку она построена на данных наблюдений только в авроральной области. Напрашивается вывод, что экстраполяции моделей, построенных по наблюдениям умеренных бурь (в данном случае C93 и АРМ), не способны дать объективную оценку положения экваториальной границы аврорального овала при экстремальных бурях. Однако с уверенностью говорить о том, что закономерности связи положения овала и интенсивности бури, установленные для умеренных и сильных бурь, нарушаются для экстремальных бурь, было бы преждевременно, поскольку модель L2025 нельзя считать надежно обоснованной.

Кроме того, кривые по АРМ для $|AL|=1000$ и 1500 нТл (см. рис. 2) показывают, что корректно описать динамику аврорального овала во время бурь без учета влияния суббурь невозможно, поскольку суббури приводят к существенному смещению экваториальной границы овала к югу.

Для того чтобы наглядно представить риск для различных регионов РФ, в таблице приведены геомагнитные координаты основных городов. Модель C93 показывает (см. рис. 2), что при умеренных бурях с $|Dst|\sim 200$ нТл экваториальная граница аврорального овала доходит до широты Санкт-Петербурга ($\Phi\sim 57^\circ$), а до широты Москвы и Екатеринбурга ($\Phi\sim 52^\circ-54^\circ$) может сместиться только при сильной буре с $|Dst|\sim 400$ нТл. При этом модель L2025 предсказывает, что при буре с $|Dst|\sim 200$ нТл экваториальная граница овала достигнет Санкт-Петербурга,

при $|Dst|\sim 300$ нТл — Иркутска ($\Phi\sim 48^\circ$), а при экстремальной буре с $|Dst|\sim 500$ нТл — Севастополя ($\Phi\sim 40^\circ$). Однако комбинированное воздействие бурь и суббурь существенно меняет картину. По АРМ авроральный овал расширится до средних широт даже при относительно умеренных (согласно Dst) бурях. Так, при $|Dst|\sim 400$ нТл и $|AL|\sim 1500$ нТл граница аврорального овала опустится ниже Иркутска до $\Phi\sim 45^\circ$. При экстремальной буре с $|Dst|\sim 600$ нТл суббуря с $|AL|\sim 1500$ нТл может сместить границу овала до широт $\Phi\sim 45^\circ$, предсказываемых моделью L2025.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ОВАЛА

Для оценки попадания конкретных регионов РФ в зону риска вследствие магнитных бурь мы нанесли на карту экваториальные границы аврорального овала, полученные по аппроксимационным формулам моделей C93 (рис. 3) и АРМ_GEO (рис. 4). Положение границ было рассчитано для определенных уровней магнитной активности и для моментов времени, соответствующих полночи на меридиане Москвы (21 UT). Модельные геомагнитные широты пересчитаны в географическую широту с использованием модели AACGM (Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinates) [Shepherd, 2014].

Модель C93 дает возможность предсказать положение границы аврорального овала при различных

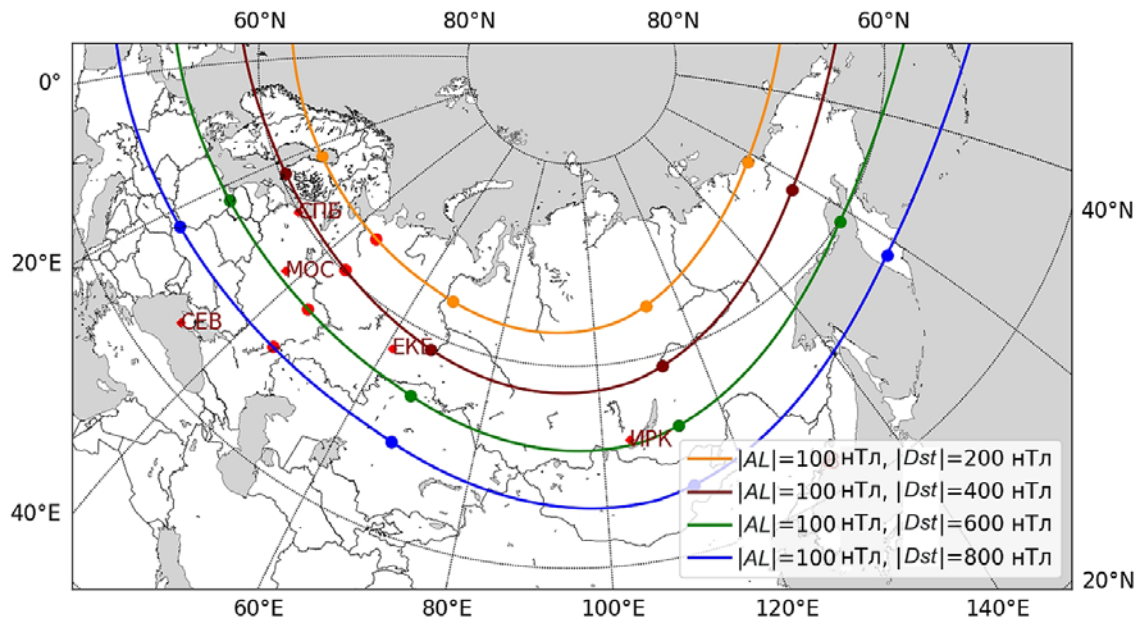


Рис. 4. Географическое положение экваториальной границы аврорального овала для территории РФ согласно APM_GEO для бурь без суббурь ($|AL|=100$ нТл) с $|Dst|=200, 400, 600, 800$ нТл. Точки на кривых обозначают центры секторов, для которых рассчитываются наборы коэффициентов; красные точки отмечают полночь на меридиане Москвы

значениях AL -индекса. Как показывает рис. 3, в полночь при сильной суббуре ($|AL|=1000$ нТл) экваториальная граница овала достигает Санкт-Петербурга, а при суперсуббуре ($|AL|=2000$ нТл) находится южнее Москвы.

На рис. 4 показано положение экваториальной границы аврорального овала для бури без суббури при $|AL|=100$ нТл и разных $|Dst|$ (200, 400, 600 и 800 нТл) согласно результатам расчетов по APM_GEO. При умеренных бурях ($|Dst|\sim 200$ нТл) эта граница проходит севернее Санкт-Петербурга, а при экстремальных ($|Dst|\sim 600$ нТл) — достигает Москвы и Иркутска. Таким образом, согласно APM_GEO, область овала и вероятных ГИТ может покрывать значительную часть территории РФ только при очень интенсивных бурях.

Однако нельзя построить единую картину положения экваториальной границы аврорального овала для магнитных бурь из-за возможности возникновения интенсивных суббурь (с большими значениями $|AL|$) на фоне бури. Положения экваториальной границы овала по APM_GEO при умеренной буре с $|Dst|=200$ нТл для суббурь с $|AL|=100, 1000, 2000$ нТл показаны на рис. 5. В отсутствие суббурь авроральный овал покрывает Кольский п-ов и Белое море. При сильной суббуре ($|AL|=1000$ нТл) экваториальная граница овала проходит несколько севернее Москвы и Екатеринбурга. При суперсуббуре ($|AL|=2000$ нТл) экваториальная граница овала доходит до северного побережья Каспийского моря.

Аналогично для района Дальнего Востока, находящегося в полярном секторе авроральной зоны, на фоне умеренной магнитной бури без сильных суббурь авроральный овал покрывает Чукотку (рис. 6). При сильной суббуре ($|AL|=1000$ нТл) экваториальная граница овала достигает Магадана. При суперсуббуре ($|AL|=2000$ нТл) экваториальная граница овала доходит до южной оконечности Камчатки.

ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА СУББУРЬ НА ФОНЕ БУРИ

Принципиальная проблема при определении положения экваториальной границы аврорального овала во время магнитных бурь, характеризуемых величиной Dst -индекса, заключается в возможности появления интенсивных суббурь, которые дополнительно влияют на положение границы и увеличивают степень негативного воздействия на техногенные системы. В этой связи целесообразно рассмотреть две ситуации:

1) бури без суббури — отсутствие суббурь ($|AL|\leq 100$ нТл) в процессе развития бури;

2) суббури большой интенсивности ($|AL|\geq 1000$ нТл) во время бури, при которых происходит значительное смещение экваториальной границы овала к низким широтам, что особенно актуально для ночного сектора.

Поскольку нас интересуют риски сбоев в работе техногенных объектов в промышленных регионах РФ, мы оценили по моделям APM_GEO и L2025 геомагнитные условия, при которых эти риски возникают.

На рис. 7 показана зависимость положения экваториальной границы аврорального овала Φ от Dst -индекса при значениях $|AL|$ от 500 до 2500 нТл, ранее представленная в работе [Воробьев и др., 2025]. К этим зависимостям добавлены положения границы овала по модели L2025. На оси ординат показана исправленная геомагнитная широта. При умеренной магнитной буре $|Dst|\sim 200$ нТл и небольшой суббуре $|AL|\sim 1000$ нТл в зону риска попадает Санкт-Петербург ($\Phi\sim 57^\circ$). При усилении суббури $|AL|\sim 1000$ нТл зона риска захватывает Екатеринбург ($\Phi\sim 54^\circ$) и Москву ($\Phi\sim 52^\circ$). Если на фоне бури развивается суперсуббуря с $|AL|\sim 2500$ нТл, в зоне риска оказываются Иркутск

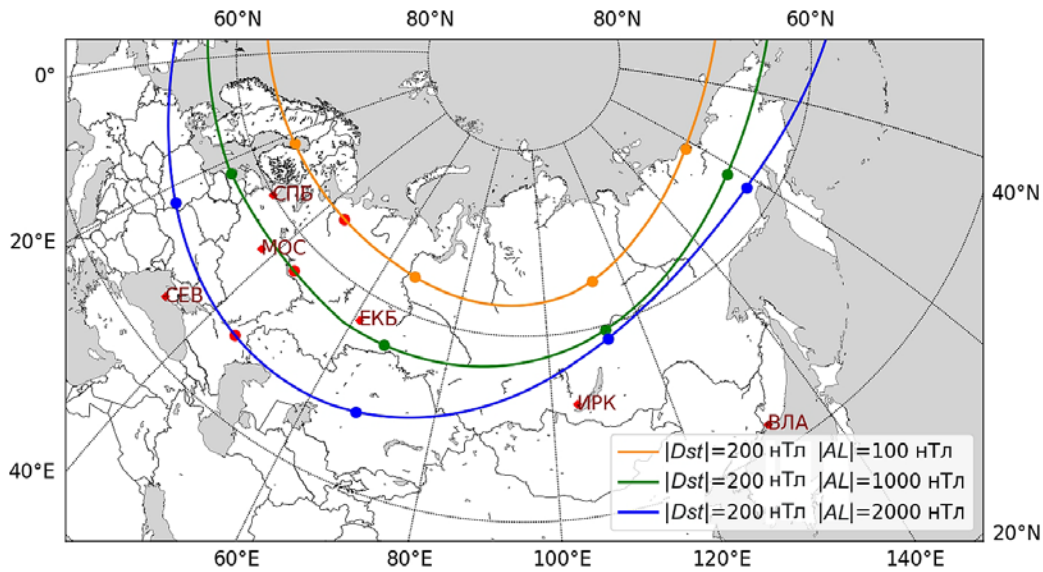


Рис. 5. Географическое положение экваториальной границы аврорального овала для территории РФ согласно APM_GEO для умеренных бурь ($|Dst|=200$ нТл) с суббурями разной интенсивности ($|AL|=100, 1000, 2000$ нТл) в момент полночи на меридиане Москвы. Обозначения те же, что и на рис. 4

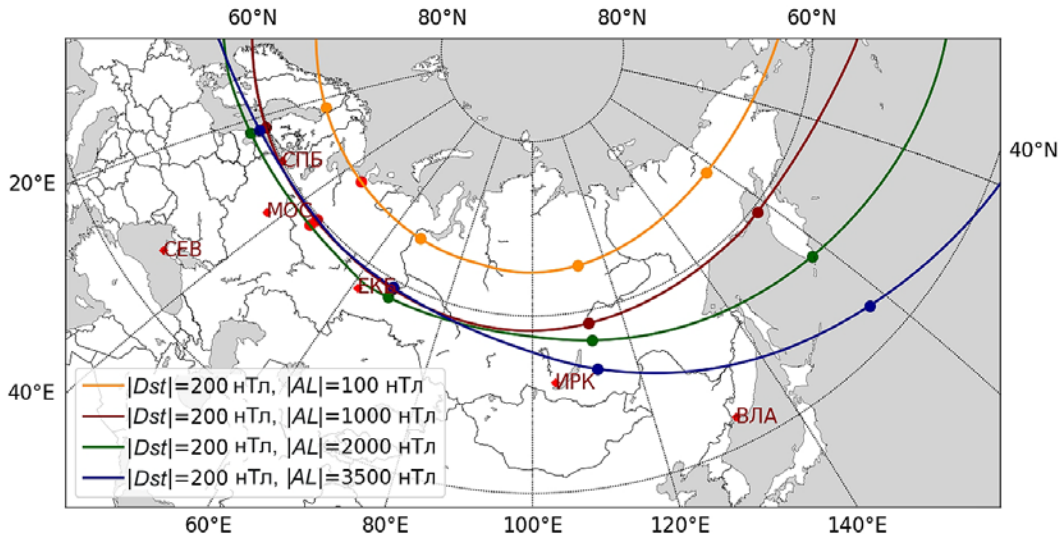


Рис. 6. Географическое положение экваториальной границы аврорального овала для территории РФ согласно APM_GEO для умеренных бурь ($|Dst|=200$ нТл) с суббурями разной интенсивности ($|AL|=100, 1000, 2000$ нТл) в момент полночи на Дальнем Востоке. Обозначения те же, что и на рис. 4

($\Phi \sim 48^\circ$) и Севастополь ($\Phi \sim 40^\circ$). Таким образом, один и тот же объект может подвергаться риску при разных величинах $|Dst|$ -индекса в зависимости от интенсивности суббури.

ГРАНИЦЫ ОВАЛА ДЛЯ БУРИ 10–11 МАЯ 2024 Г.

Анализировать предсказания модели ОР для экстремальных бурь не представляется возможным, поскольку параметры межпланетной среды для тех событий неизвестны. А потому мы рассмотрим сильнейшую в первой четверти этого столетия магнитную бурю 10–11 мая 2024 г., во время которой Dst -индекс достигал -406 нТл (02 UT 11 мая, рис. 8). Во время этого события ионосфера была сильно возмущена [Huyadutije et al., 2025], на Кольском п-ове были зарегистрированы всплески ГИТ $\sim 15\text{--}30$ А

в ЛЭП «Северный транзит» в ночном и утреннем секторах [Despirak et al., 2025] и даже в энергетических системах Центральной Америки наблюдались всплески ГИТ до ~ 20 А [Caraballo et al., 2025].

С ~ 17 UT 10 мая по ~ 11 UT 11 мая 2024 г. на нескольких длительных временных интервалах B_z -компонента ММП имела южное направление и величину ~ 40 нТл (см. рис. 8). Такая ориентация ММП благоприятствовала постоянному притоку энергии в магнитосферу, что подпитывало бурю с Dst -индексом порядка нескольких сотен нТл. Вариации геомагнитных индексов и параметров межпланетной среды по данным OMNI показывают, что во время бури произошло две суперсуббури с $|AL| > 3000$ нТл (показаны на рис. 8 вертикальными штриховыми линиями) [Gonzalez et al., 2011]. Во время развития суперсуббури никаких резких изменений параметров солнечного ветра и ММП не происходило.

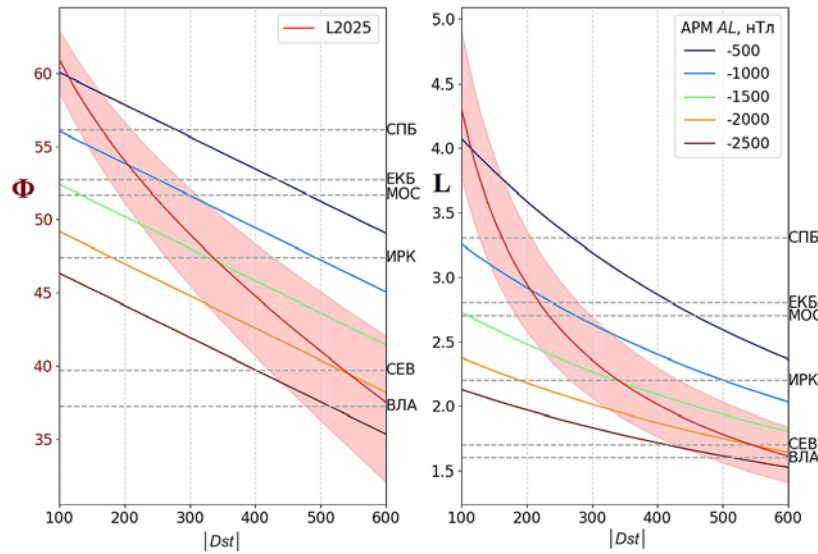


Рис. 7. Зависимость исправленной геомагнитной широты экваториальной границы аврорального овала Φ от Dst -индекса по моделям L2025 и АРМ при значениях $|AL|$ от 500 до 2500 нТл для сектора 21–24 MLT. Серыми штриховыми линиями отмечены широты выбранных городов РФ

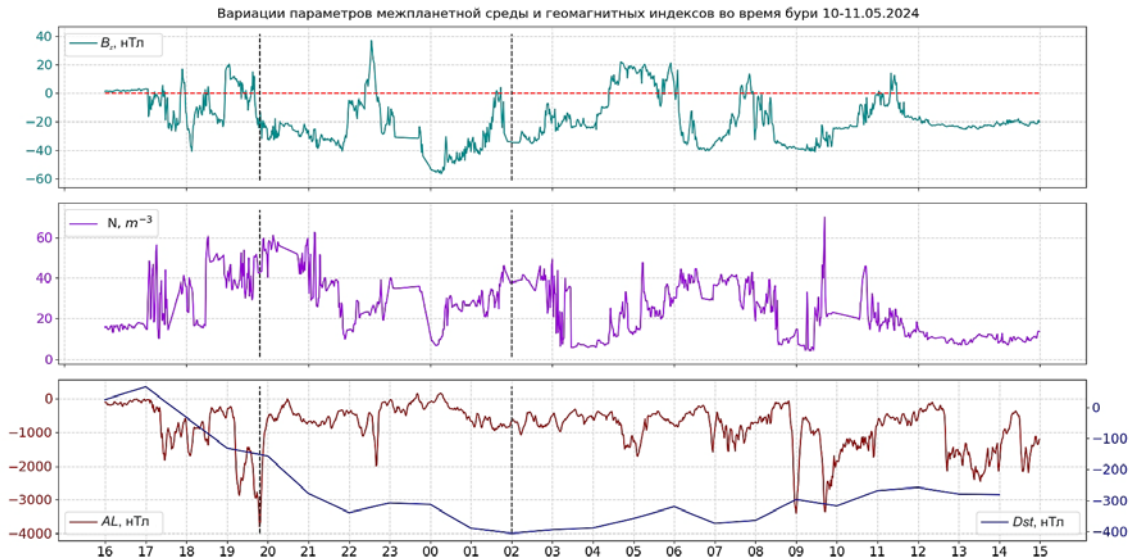


Рис. 8. Вариации параметров межпланетной среды — компоненты B_z ММП (верхняя панель) и плотности солнечного ветра N (средняя панель), а также геомагнитных индексов AL и Dst (нижняя панель) во время бури с 16:00 UT 10 мая 2024 г. по 15:00 UT 11 мая 2024 г. Вертикальной штриховой линией отмечены характерные моменты, которые рассматриваются на рис. 9

Таким образом, суббури развились спонтанно и вследствие большой энергии, закачанной в магнитосферу, достигли большой интенсивности.

Сопоставим пространственную структуру овала по моделям АРМ_GEO и ОР для нескольких характерных моментов в развитии этой бури. Это сопоставление покажет относительный вклад суббурь в процесс развития бури. Суперсуббурия на фазе роста бури наблюдалась 10 мая 2024 г. в 19:48 UT, при этом геомагнитные индексы достигали значений $Dst = -157$ нТл, $AL = -3797$ нТл. Модель ОР демонстрирует распределение потока энергии высыпающихся электронов в границах аврорального овала согласно значениям межпланетных параметров. По этой модели экваториальная граница овала доходит только до Санкт-Петербурга (рис. 9, верхняя панель). В то же

время по АРМ_GEO в зону риска попадают все крупные города за исключением Владивостока. В 02:00 UT 11 мая 2024 г., когда Dst -индекс достиг экстремального значения -406 нТл, а авроральный индекс $AL = -641$ нТл (см. рис. 8), модель ОР дает примерно ту же картину положения аврорального овала (см. рис. 9, нижняя панель), тогда как АРМ_GEO показывает, что экваториальная граница овала доходит до Екатеринбурга. В данной ситуации положение границ овала определяется в основном величиной Dst -индекса. При больших значениях Dst овал расширяется в направлении утро–вечер [Yagodkina et al., 2012], что мы и наблюдаем, но модель ОР эту особенность воспроизвести не может.

На фазе восстановления бури 11 мая 2024 г. в 09:00 UT эпицентр суббури находился над Северной

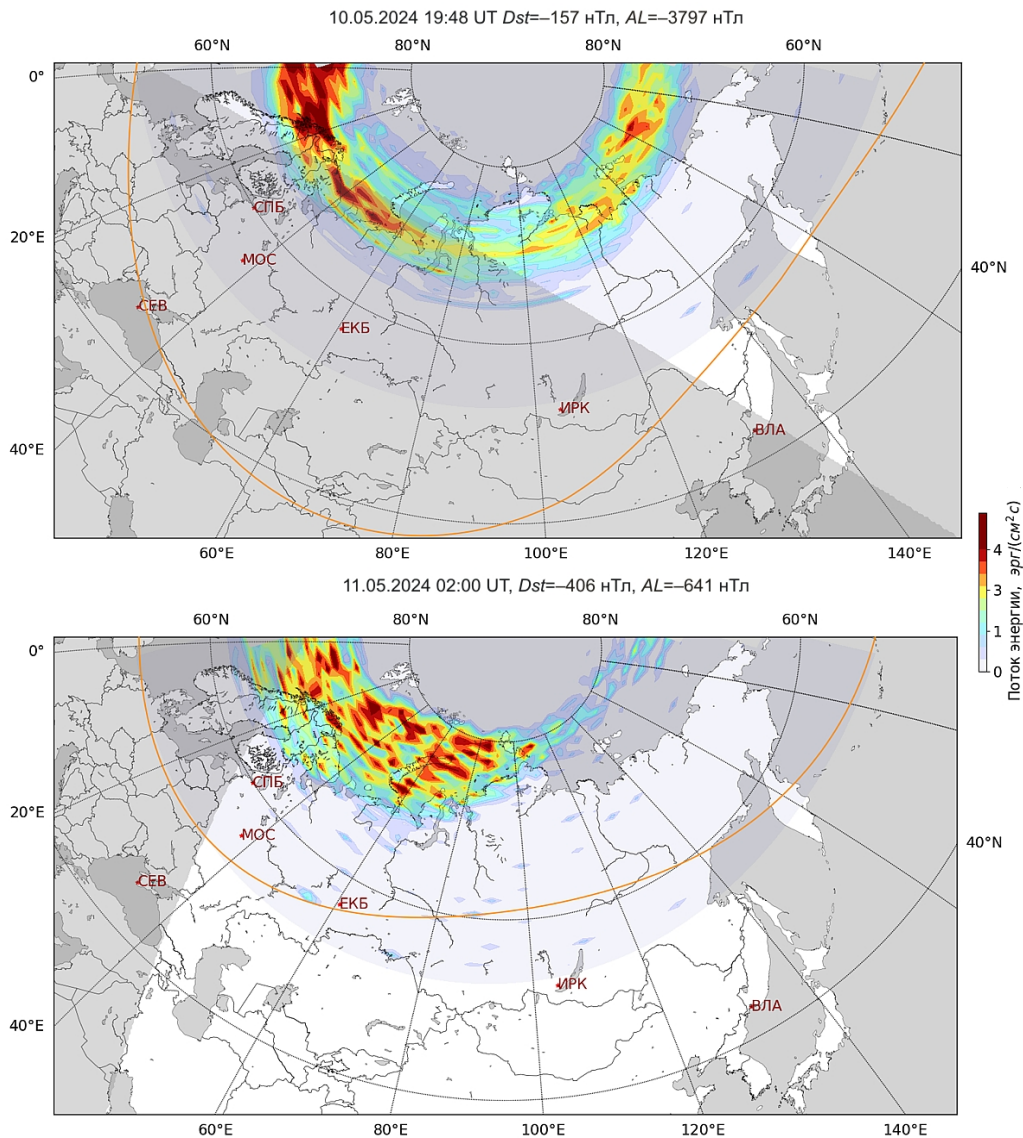


Рис. 9. Сопоставление пространственной картины аврорального овала над территорией РФ по модели ОР и экваториальной границы овала по APM_GEO (желтая линия) для характерных моментов магнитной бури 10–11 мая 2024 г.: верхняя панель — суперсуббури на фоне фазы роста магнитной бури 10 мая 2024 г. в 19:48 UT с индексами $Dst=-157$ нТл, $AL=-3797$ нТл; нижняя панель — максимум магнитной бури 11 мая 2024 г. в 02:00 UT с индексами $Dst=-406$ нТл, $AL=-641$ нТл. Бледное кольцо на карте обусловлено ненулевым фоном модели ОР

Америкой и Гренландией, и здесь этот интервал не рассматривается.

Таким образом, модель ОР, управляемая только параметрами межпланетной среды, не воспроизводит отклик аврорального овала на спонтанно развивающиеся суббури и дает его сильно усредненное положение по сравнению с APM_GEO.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе статистического анализа данных, охватывающих солнечные циклы 14–24, получена оценка, что буря класса «один раз в столетие» имеет интенсивность порядка $|Dst|=663$ нТл [Pulkkinen et al., 2012; Love, 2021]. Согласно модели L2025, буря такой интенсивности вызовет дискретные полярные сияния вплоть до геомагнитной широты 34° и подвергнет риску электроэнергетические системы на всей территории Соединенных Штатов и Европы. Для са-

мой мощной из зарегистрированных до сих пор бури Кэррингтона 2 сентября 1859 г. ($Dst=-964$ нТл) по модели L2025 экваториальная граница должна была оказаться на геомагнитной широте $\sim 24^\circ$, что вызвало бы высокий уровень ГИТ в энергосистемах Японии и большей части Китая. В РФ при таких бурях заведомо возникнут сбои в работе ГНСС в большей части густонаселенных районов, а воздействию ГИТ подвергнется вся энергосистема РФ.

Интенсивность магнитных бурь характеризуется индексом Dst , который имеет ясный физический смысл. Соотношение Десслера—Паркера—Скопке [Мазур, Шухман, 2015] связывает возмущение магнитного поля $\Delta B \sim Dst$ в центре системы с полной кинетической энергией W_K частиц кольцевого тока:

$$\frac{\Delta B}{B_E} = \frac{2 W_K}{3 W_B}, \tag{5}$$

где W_B — полная энергия магнитного поля в системе; V_E — величина дипольного магнитного поля в центре системы. Поскольку Dst -индекс линейно растет с энергией, из (5) следует, что экстремальным магнитным бурям соответствует необычайно большая энергия частиц кольцевого тока, захваченных в магнитосферную магнитную ловушку. Динамика аврорального овала при бурях должна быть тесно связана с динамикой основных магнитосферных структур [Хорошева, 1987]. Максимум интенсивности релятивистских электронов радиационного пояса L_{max} связан с интенсивностью бури соотношением $L_{max} = 12.9/\sqrt[4]{|Dst|}$ [Тверская, 2011], т. е. $L_{max} \sim 2.9$ для бури с $Dst = -400$ нТл.

Если принять предсказания модели L2025, то сжатие магнитосферы при экстремальных бурях не достигает ожидаемого насыщения. Так, согласно L2025 граница аврорального овала с ростом возмущения сильно смещается в низкие широты и при $|Dst| \sim 700$ нТл достигает $L \sim 1.5$ (см. рис. 2). Трудно представить, что при этом происходит с положением основных магнитосферных структур — кольцевого тока, радиационного пояса и др. По-видимому, несколько преждевременно рассматривать такой сценарий, поскольку модель L2025 построена не на самых надежных данных и нет уверенности, что все наблюдения относятся к сияниям в зените и в ночном секторе. К тому же неизвестна суббуревая динамика во время экстремальных бурь и возникают сомнения, что широта наблюдаемых полярных сияний определялась только Dst -индексом. Оценки геомагнитных индексов при исторических экстремальных бурях также весьма неопределенны. В целом часто встречается такая ситуация, когда, по свидетельствам очевидцев, полярные сияния даже при умеренных магнитных бурях были видны вплоть до очень низких широт и гораздо южнее, чем дают все существующие модели аврорального овала [Spogli et al., 2024]. По всей вероятности, наблюдатели принимали за авроральный овал красную дугу на более низких широтах.

Экстраполяции моделей C93 и APM_GEO дают существенно меньший эффект смещения к югу аврорального овала при экстремальных бурях по сравнению с моделью L2025, следовательно, размер территорий, которым может угрожать возбуждение ГИТ, оказывается также значительно меньше. Однако развитие интенсивных суббурь в процессе эволюции бури может вызвать, согласно APM_GEO, дополнительное смещение экваториальной границы овала и, соответственно, электроджета к средним широтам и значительно увеличить область негативного воздействия на техногенные системы.

Ведется разработка моделей для оперативного прогноза динамики аврорального овала при изменениях космической погоды [Machol et al., 2012]. Эмпирическая модель ОР, позволяющая рассчитать зависимость между интенсивностью авроральных высыпаний и вероятностью их наблюдения, использована на веб-сервисе NOAA [<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>], который предсказывает вероятность наблюдения полярных сияний в ближайшие 30 мин. На основе модели ОР разработан также

веб-сервис для визуализации вероятности появления полярных сияний, построенный методами географических информационных систем [Vorobev et al., 2020a, b]. Входными параметрами этих моделей являются поступающие на сайт NASA данные в реальном времени по солнечному ветру и ММП со спутников, находящихся в точке либрации. Сдвиг по времени (~ 1 ч) за счет распространения солнечного ветра от точки либрации L1, вблизи которой находится спутник, к границе магнитосферы дает принципиальную возможность краткосрочного прогноза ожидаемой интенсивности полярных сияний по земному шару. Казалось бы, эти же модели могут быть использованы для предсказания положения пространственных зон с большими возможными ГИТ, однако есть несколько обстоятельств, которые существенно затрудняют решение этой проблемы.

Хотя сила ГИТ в среднем растет с увеличением мощности полярных сияний, но простой линейной зависимости между ними не существует, поскольку наиболее существенные всплески ГИТ обусловлены локальными вихревыми токовыми структурами на фоне аврорального электроджета, и эти структуры могут быть связаны с локальными уярчениями полярных сияний [Engebretson et al., 2019; Apatenkov et al., 2020]. Таким образом, близость аврорального овала и электроджета к технологической системе является необходимым, но недостаточным условием для появления сильных ГИТ. Кроме того, наибольшие возмущения геомагнитного поля и смещения аврорального овала и электроджета к югу во время бури связаны с суббурями, возникновение которых модель ОР предсказать не может. В результате модель ОР дает очень усредненное положение овала и заметно недооценивает его смещение к югу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если рассматривать авроральный овал как индикатор положения электроджета, то информация о положении овала позволяет предсказать, на каких широтах могут наблюдаться наиболее интенсивные вариации геомагнитного поля, которые являются источником опасных ГИТ в электроэнергетических системах. Для предсказания положения овала при умеренных и сильных бурях и суббурях широко используются модели C93, APM и ОР. Для построения статистической модели L2025 минимальной широты экваториальной границы дискретных сияний Love et al. [2025] использовали опубликованные сведения о визуальных наблюдениях полярных сияний во время экстремальных бурь. Проведенное нами сопоставление зависимостей широты сияний от интенсивности бури, полученных экстраполяцией моделей C93 и APM, с предсказаниями модели L2025 показало, что закономерности связи овала и интенсивности бури, установленные для средних и сильных бурь ($|Dst| < 400$ нТл), нарушаются при экстремальных бурях ($|Dst| > 400$ нТл). На примере экстремальной бури 10–11 мая 2024 г. показано, что модель ОР дает очень усредненное положение овала и заметно недооценивает его смещение к югу. Это обусловлено тем, что наибольшие возмущения геомагнитного поля

и смещения аврорального овала и электроджета во время бури связаны со спонтанно развивающимися суперсуббуриями, возникновение которых модель ОР предсказать не может. Для оценки возможных рисков, вызванных ГИТ, необходима апробация карт положения экваториальной границы овала для территории РФ для возможных значений *Dst* и *AL* по разным моделям. На примере такой карты, представленной в этой работе, показано, что согласно АРМ_ГЕО резкое понижение экваториальной границы овала происходит при суббуриях, развивающихся на фоне бурь. В результате с учетом суммарного эффекта бурь и суббурь все крупные энергетические сети РФ оказываются подвержены влиянию ГИТ, а в средней полосе могут возникать сбои в работе ГНСС не только при экстремальных, но и при сильных магнитных бурях.

Выражаем признательность В.Г. Воробьеву за полезные обсуждения и Мингалеву О.В. за помощь в расчетах по АРМ_ГЕО.

Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005, т. 45, № 4, с. 467–473.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика авроральных высыпаний в периоды сильных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007, т. 47, № 2, с. 198–205.
- Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И. и др. Геоиндуцированные токи и их связь с положением западной электроструи и границами авроральных высыпаний. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. т. 5, вып. 4, с. 16–28. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.16-28>.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Мельник М.Н., Мингалев О.В. Планетарное распределение характеристик электронных и ионных высыпаний в зависимости от уровней магнитной активности. Интерактивная модель АРМ_ГЕО. *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLVI Annual Seminar*. Apatity, 2023, с. 127–136. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2023.46.028>.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ночные авроральные высыпания при экстремальных уровнях геомагнитной активности. *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLVIII Annual Seminar*. Apatity, 2025, с. 54–58. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2025.48.012>.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе. *Физика Земли*. 2018, № 4, с. 19–30. <https://doi.org/10.1134/S0002333718040051>.
- Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012, т. 52, № 1, с. 64–72.
- Костарев Д.В., Пилипенко В.А., Козырева О.В. Геомагнитный мониторинг для снижения риска для трубопроводов от космической погоды. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2023, т. 13, № 1, с. 38–49. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2023-13-1-38-49>.
- Мазур В.А., Шухман И.Г. К выводу соотношения Десслера—Паркера—Скопке. *Солнечно-земная физика*. 2015, Т. 1, № 2, с. 80–84. <https://doi.org/10.12737/7495>.
- Мягкова И.М., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Марьин Б.В. Возрастания потоков выпадающих энергичных электронов на границе внешнего радиационного пояса Земли и положение границ аврорального овала. *Космические исследования*. 2010, т. 48, № 2, с. 169–177.
- Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 3, с. 72–110. <https://doi.org/10.12737/szf-73202106> / Pilipenko V.A. Impact of space weather on ground-based technological systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 68–104. <https://doi.org/10.12737/stp-73202106>.
- Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023a, т. 23, № 2, ES2008. <https://doi.org/10.2205/2023ES000824>.
- Пилипенко В.А., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Розенберг И.Н. Космическая погода и железные дороги. *Земля и Вселенная*. 2023б, № 6, с. 22–34. <https://doi.org/10.7868/S0044394823060026>.
- Старков Г.В. Планетарная морфология сияний. *Магнитосферно-ионосферная физика. Краткий справочник*. СПб.: Наука, 1993, с. 85–90.
- Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1994, т. 34, № 3, с. 80–86.
- Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011, т. 51, № 1, с. 8–24.
- Фельдштейн Я.И. Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1963, т. 3, № 2, с. 227–239.
- Хорошева О.В. Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961, т. 1, № 5, с. 695–701.
- Хорошева О.В. Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмопаузы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1987, т. 27, № 5, с. 804–811.
- Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Первалова Н.П., Полякова А.С. *Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS*. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013, 259 с.
- Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I., et al. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophys. Res. Lett.* 2020, vol. 47, e2019GL086677. <https://doi.org/10.1029/2019GL086677>.
- Baker D.N., Balstad R., Bodeau J.M., et al. Severe space weather events — Understanding societal and economic impacts. The National Academy Press, Washington, 2008. <https://doi.org/10.17226/12507>.
- Blake S.P., Pulkkinen A., Schuck P.W., et al. Estimating maximum extent of auroral equatorward boundary using historical and simulated surface magnetic field data. *J. Geophys. Res.* 2021, vol. 126, iss. 2, e2020JA028284. <https://doi.org/10.1029/2020JA028284>.
- Boroyev R.N., Vasiliev M.S., Baishev D.G. The relationship between geomagnetic indices and the interplanetary medium parameters in magnetic storm main phases during CIR and ICME events. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 204, 105290. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105290>.
- Boteler D.H. Geomagnetic hazards to conducting networks. *Natural Hazards*. 2003, vol. 28, iss. 2, pp. 537–561. <https://doi.org/10.1023/A:1022902713136>.
- Caraballo R., Gonzalez-Esparza J.A., Pacheco C.R., et al. The impact of geomagnetically induced currents (GIC) on the Mexican power grid: Numerical modeling and observa-

- tions from the 10 May 2024 geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2025, vol. 52, iss. 4, e2024GL112749. <https://doi.org/10.1029/2024GL112749>.
- Carbary J.F., Sotirelis T., Newell P.T., Meng C.-I. Auroral boundary correlations between UVI and DMSP. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, iss. A1, pp. SIA2-1–SIA2-7. <https://doi.org/10.1029/2002JA009378>.
- Chisham G., Burrell A.G., Thomas E.G., Chen Y.-J. Ionospheric boundaries derived from auroral images. *J. Geophys. Res.* 2022, vol. 127, iss. 7, e2022JA030622. <https://doi.org/10.1029/2022JA030622>.
- Despirak I., Setsko P., Lubchich A., et al. Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic storm on 10–12 May 2024. *Adv. Space Res.* 2025. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.06.081>.
- Dimmock A.P., Rosenqvist L., Hall J.-O., et al. The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm. *Space Weather.* 2019, vol. 17, iss. 7, pp. 989–1010. <https://doi.org/10.1029/2018SW002132>.
- Edemskiy I.K., Yasyukevich Y.V. Auroral oval boundary dynamics on the nature of geomagnetic storm. *Remote Sens.* 2022, vol. 14, 5486. <https://doi.org/10.3390/rs14215486>.
- Effects of Space Weather on Technology Infrastructure.* Kluwer Academic Publishers, 2004, 343 p. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2754-0>.
- Engebretson M.J., Steinmetz E.S., Posch J.L., et al. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 2. Multiple-instrument observations. *J. Geophys. Res.* 2019, vol. 124, pp. 7459–7476. <https://doi.org/10.1029/2019JA026797>.
- Evdokimova M.A., Petrukovich A.A. Estimation of westward auroral electrojet current with magnetometer chain data. *Ann. Geophys.* 2020, vol. 38, pp. 109–121. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-109-2020>.
- Feldstein Y.I., Gromova L.I., Grafe A., et al. Dynamics of the auroral electrojets and their mapping to the magnetosphere. *Radiation Measurements.* 1999, vol. 30, iss. 5, pp. 579–587. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00219-X).
- Gary J.B., Zanetti L.J., Anderson B.J., et al. Identification of auroral oval boundaries from in situ magnetic field measurements. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, iss. A3, pp. 4187–4197. <https://doi.org/10.1029/97JA02395>.
- Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., et al. Interplanetary origin of intense, superintensive and extreme geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 158, iss. 1, pp. 69–89. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2>.
- Hapgood M.A. Prepare for the coming space weather storm. *Nature.* 2012, vol. 484, pp. 311–313. <https://doi.org/10.1038/484311>.
- Hiyadutuje A., Bilitza D., Ojebisi T., et al. Assessment of the performance of the IRI's auroral oval boundary model as applied to the Mother's Day G5 storm during 10–13 May 2024. *Adv. Space Res.* 2025, vol. 76, iss. 12, pp. 7241–7250. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.003>.
- Johnsen M.G. Real-time determination and monitoring of the auroral electrojet boundaries. *J. Space Weather Space Climate.* 2013, vol. 3, A28. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013050>.
- Kataoka R., Ngwira C. Extreme geomagnetically induced currents. *Progress in Earth and Planetary Science.* 2016, vol. 3, 23. <https://doi.org/10.1186/s40645-016-0101-x>.
- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., et al. Correspondence between the ULF wave power distribution and auroral oval. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 2, pp. 46–65. <https://doi.org/10.12737/20999>.
- Kozyreva O., Pilipenko V., Belakhovsky V., Sakharov Y. Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015, storm. *Earth, Planets and Space.* 2018, vol. 70, 157. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0933-2>.
- Love J.J. Extreme-event magnetic storm probabilities derived from rank statistics of historical *Dst* intensities for solar cycles 14–24. *Space Weather.* 2021, vol. 19, iss. 4, e2020SW002579. <https://doi.org/10.1029/2020SW002579>.
- Love J.J., Mann I.R., Qvick T., Mursula K. What is the lowest latitude of discrete aurorae during superstorms? *Space Weather.* 2025, vol. 23, e2024SW004286. <https://doi.org/10.1029/2024SW004286>.
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., et al. Evaluation of OVATION prime as a forecast model for visible aurorae. *Space Weather.* 2012, vol. 10, S03005. <https://doi.org/10.1029/2011SW000746>.
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., et al. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A01206. <https://doi.org/10.1029/2006JA012015>.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A09207. <https://doi.org/10.1029/2009JA014326>.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A03216. <https://doi.org/10.1029/2009JA014805>.
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y., et al. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather.* 2014, vol. 12, pp. 368–379. <https://doi.org/10.1002/2014SW001056>.
- Palloccchia G., Amata E., Consolini G., et al. Geomagnetic *Dst* index forecast based on IMF data only. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, pp. 989–999. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-989-2006>.
- Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J. Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, iss. 6, pp. 1192–1205. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.152>.
- Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Belakhovsky V.B., et al. What should we know to predict geomagnetically induced currents in power transmission lines? *Russian Journal of Earth Sciences.* 2024, vol. 24, ES6006. <https://doi.org/10.2205/2024es000954>.
- Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., et al. Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios. *Space Weather.* 2012, vol. 10, iss. 4, S04003. <https://doi.org/10.1029/2011SW000750>.
- Shepherd S.G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 7501–7521. <https://doi.org/10.1002/2014JA020264>.
- Sotirelis T., Newell P.T. Boundary-oriented electron precipitation model. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, iss. A8, pp. 18655–18673. <https://doi.org/10.1029/1999JA000269>.
- Spogli L., Alberti T., Bagiacchi P., et al. The effects of the May 2024 Mother's Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication. *Ann. Geophys.* 2024, vol. 67, iss. 2, PA218. <https://doi.org/10.4401/ag-9117>.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 102, pp. 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>.
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., et al. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology. *Russian J. Earth Science.* 2020a, vol. 20, ES6001. <https://doi.org/10.2205/2020ES000721>.
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G., et al. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters.

- Scientific Visualization*. 2020b, vol. 12, no. 3, pp. 108–118. <https://doi.org/10.26583/sv.12.3.10>.
- Walker S.J., Laundal K.M., Reistad J.P., et al. A comparison of auroral oval proxies with the boundaries of the auroral electrojets. *Space Weather*. 2024, vol. 22, iss. 4, e2023SW003689. <https://doi.org/10.1029/2023SW003689>.
- Woodroffe J.R., Morley S.K., Jordanova V.K., et al. The latitudinal variation of geoelectromagnetic disturbances during large ($Dst \leq -100$ nT) geomagnetic storms. *Space Weather*. 2016, vol. 14, iss. 9, pp. 668–681. <https://doi.org/10.1002/2016SW001376>.
- Xiong C., Lühr H., Wang H., Johnsen M.G. Determining the boundaries of the auroral oval from CHAMP field-aligned current signatures — Part 1. *Ann. Geophys.* 2014, vol. 32, iss. 6, pp. 609–622. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-609-2014>.
- Yagodkina O.I., Despirak I.V., Vorobjev V.G. Spatial distribution of auroral precipitation during storms caused by magnetic clouds. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 77, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.06.009>.
- Zou Y., Dowell C., Ferdousi B., et al. Auroral drivers of large dB/dt during geomagnetic storms. *Space Weather*. 2022, vol. 20, iss. 11, e2022SW003121. <https://doi.org/10.1029/2022SW003121>.
URL: <http://apm.pgia.ru/data> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
URL: <https://pgia.ru/data/spaceweather/> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Савельева Н.В., Пилипенко В.А., Ягодкина О.И. Какие широты РФ могут быть подвержены воздействию экстремальных магнитных бурь? *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 24–37. <https://doi.org/10.12737/szf-122202603>.