Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 233–236.

УДК 550.388.2, 551.510.413.5, 551.510.537
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-233
ORCID: 0009-0000-4910-9902

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ 10-13 НОЯБРЯ 2025 Г. ПО ДАННЫМ КВ-РАДАРОВ

И.Ю. Дюков, А.В. Ойнац

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, diy@iszf.irk.ru

STUDYING SPATIAL-TEMPORAL LOCALIZATION FEATURES OF SMALL-SCALE IONOSPHERIC IRREGULARITIES DURING GEOMAGNETIC DISTURBANCES ON NOVEMBER 10-13, 2025 WITH THE USE OF HF RADAR DATA

I.Y. Dyukov, A.V. Oinats

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

Аннотация. В данной работе представлено исследование особенностей пространственно-временной локализации мелкомасштабных ионосферных неоднородностей во время геомагнитных возмещений 10–13 ноября 2025 г. по данным российских и канадских КВ-радаров. Обсуждаются наблюдаемая динамика ионосферного рассеяния и ее связь с индексами геомагнитной активности, параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Приводится сравнение моделей электрического потенциала, рассчитанного с использованием эмпирической модели Веймера и статистической модели TS18, скорректированной по данным измерений на КВ-радарах. Подтверждается, что модель Веймера завышает значения электрического потенциала в 2–3 раза по сравнению с TS18.

Ключевые слова: мелкомасштабные ионосферные неоднородности, SuperDARN, геомагнитная буря, электрический потенциал, Веймер, TS18

Abstract. This report presents the study of spatial-temporal localization features of small-scale ionospheric irregularities during geomagnetic disturbances on November 10–13, 2025 with the use of Canadian and Russian HF radar data. The observed ionospheric scattering dynamics and its relation to the indices of geomagnetic activity, solar wind parameters, and the interplanetary magnetic field are discussed. A comparison is made of the electric potential models calculated using the empirical Weimer model and the statistical TS18 model, corrected by measurements from HF radars. It has been confirmed that the Weimer model overstates the electric potential values by 2–3 times compared to TS18.

Keywords: Small-scale ionospheric irregularities, SuperDARN, geomagnetic storm, electric potential, Weimer, TS18

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы при попадании в магнитосферу Земли возмущают ее. В ней возникают сильные электрические поля и токи, что, в свою очередь, изменяет конфигурацию магнитосферной конвекции в полярных областях. Возможность детального исследования этого явления появилась благодаря сети коротковолновых (КВ) радаров SuperDARN, большинство из которых находится в Северной полушарии Земли [Greenwald et al., 1995; Chisham et al., 2007]. На основе полученных с помощью радаров SuperDARN параметров: мощности рассеянного сигнала от неоднородностей, доплеровской скорости, ширины спектра и т.п. — улучшаются и уточняются модели прогнозирования пространственно-временного распределения мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (МИН), вытянутых вдоль линий магнитного поля.

В данном докладе исследуется влияние геомагнитной бури 10–13 ноября 2025 г. на ионосферу в полярной, авроральной и субавроральной областях Северного полушария по данным канадских и российских КВ-радаров [Yasyukevich et al., 2026]. Изучается возможность построения карт распределения электрического потенциала (ЭП) в высоких широтах с использованием статистической модели TS18 [Thomas, Shepherd, 2018] по ограниченному набору данных КВ-радаров, а также с использованием эмпирической модели электрического поля Веймера [Weimer, 2005].

ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 10–13 НОЯБРЯ 2025 Г.

11 ноября 2025 г. на Солнце произошла вспышка класса X5.16, которая привела к очень сильной геомагнитной буре (G4) [Gonzalez et al., 1994].

На рис. 1 изображены скорость (V_{sw}, км/с) и давление (P_{sw}, нПа) солнечного ветра (СВ), компоненты B_z и B_y межпланетного магнитного поля (ММП, нТл), а также индексы, характеризующие геомагнитную активность (*SYM-H* и *AE*, нТл; *Kp*). Из графиков видно, что начальная фаза бури началась в ~22:30 UT 11 ноября 2025 г. и характеризовалась кратковременным повышением индекса *SYM-H*.

Главная фаза началась 12 ноября 2025 г. в ~00:45 UT, с этого момента индекс *SYM-H* упал до –250 нТл в течение четырех часов. Это делает данную бурю третьей по силе в 25-м цикле солнечной активности в сравнении с экстремальными бурями, произошедшими в мае (–406 нТл) и октябре (–333 нТл) 2024 г. Индекс *Kp*,

отражающий уровень возмущенности магнитного поля Земли, достиг значения 9–.

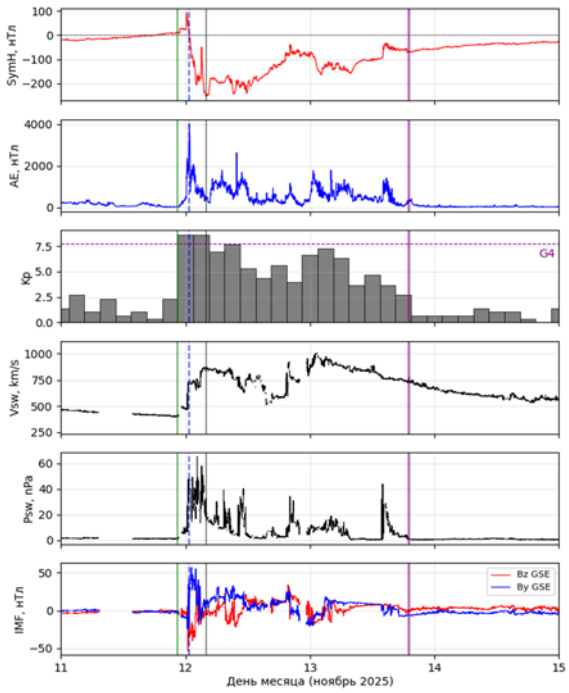

Рис. 1. Динамика индексов геомагнитной активности, СВ и ММП. Вертикальная зеленая, синяя, черная и фиолетовая линии показывают начало бури, начало главной фазы, начало фазы восстановления, конец фазы восстановления соответственно

Фаза восстановления началась в ~04:00 UT. Тогда же началось быстрое повышение индекса *SYM-H*, продолжавшееся пять часов, с плавным переходом к постепенному восстановлению его значений до невозмущенного уровня в течение трех дней.

ДАННЫЕ КВ-РАДАРОВ

Для исследования МИН и их динамики мы используем данные КВ-радаров, расположенных в Канаде (SAS, PGR, RKN, INV, CLY) и в России (EKB и MGW).

На рис. 2 в качестве иллюстрации изображено распределение доплеровской скоростей МИН по данным Екатеринбургского радара (EKB, 56.5◦ N, 58.5◦ E). Радар в рассматриваемый период времени работал на частоте 10.5 МГц. Светло-розовый цвет соответствует сигналам, имеющим скорости около нуля. Такие сигналы появляются в результате рассеяния от поверхности земли (ground scatter, GS). Динамика сигнала земного рассеяния хорошо предсказуема и объясняется суточными вариациями электронной концентрации. Красные и синие области соответствуют сигналам ионосферного рассеяния, т. е. отраженным непосредственно от МИН. Оттенки красного соответствуют движению МИН от радара, а оттенки синего — к радару.

На рисунке видно, что в главную фазу бури фиксировался интенсивный сигнал ионосферного рассеяния, магнитная широта нижней границы которого уменьшается с 60° до 54°. Далее область рассеяния выходит экваториальнее сектора регистрации радара EKB. На фазе восстановления сигнал ионосферного рассеяния наблюдался лишь отрывочно в диапазоне широт 60–70°. Сигнал земного рассеяния 12 ноября отсутствует практически полностью, и его регулярный ход восстанавливается только с 9 UT 13 ноября.

На других радарах наблюдалась схожая картина. Однако интервалы отсутствия сигнала земного рассеяния существенно длительнее, до двух суток.

Все вместе это свидетельствует о том, что в секторах КВ-радаров электронная концентрация была существенно ниже, чем в спокойных условиях за день до начала бури (9 ноября). Косвенно можно сделать вывод о том, что авроральная область расширилась на магнитные широты экваториальнее секторов регистрации указанных КВ-радаров.

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Мы построили распределения электрического потенциала (ЭП) с использованием статистической модели TS18, скорректированной по данным о скоростях и направлениях (E×B-дрейф) МИН, наблюдаемых на всех семи радарах. Дополнительно для сопоставления мы также использовали эмпирическую модель электрического поля Веймера [Weimer, 2005]. Основные различия между моделями заключаются в исходных данных (наземные радары против спутников), наборе входных параметров и целевых условиях использования.

Radar software toolkit (RST) [https://radar-software-toolkit-rst.readthedocs.io/] позволяет обрабатывать и анализировать данные КВ-радаров, а пакет pyDARN [https://pydarn.readthedocs.io/] позволяет визуализировать результаты обработки. При обработке на первом этапе в программе RST данные интерполируются на сетке по широте и долготе, рассчитывается положение границы области конвекции (Heppner-Maynard Boundary). На втором этапе добавляются данные по СВ и ММП [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/]. На третьем этапе рассчитывается распределение электрического поля с использованием модели TS18, и далее оно добавляется на карту положения и скоростей МИН.

Модель Веймера используется для построения ЭП на основе таких параметров, как угол ММП в градусах от севера к +Y, магнитуда B_t в нТл, угол наклона диполя в градусах, скорость СВ в км/с, плотность СВ в #/см^3, где # — количество частиц, геомагнитный индекс *AL*.

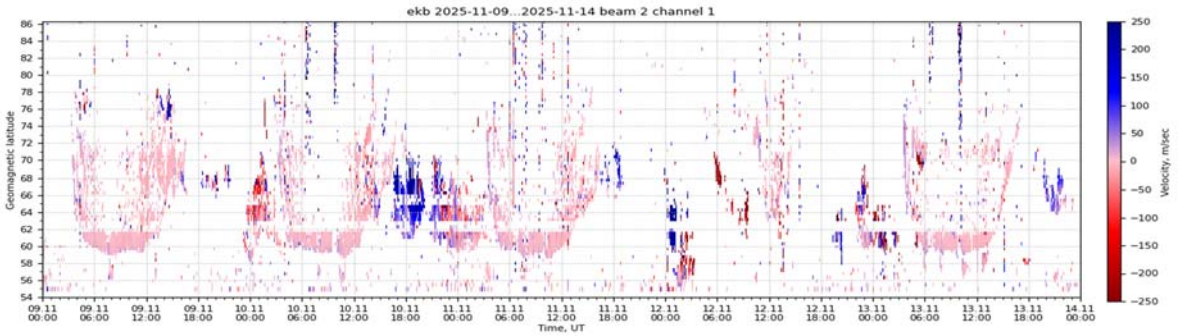

Рис. 2. График доплеровской скорости принятого сигнала в зависимости от геомагнитной широты и времени по данным радара ЕКВ 9–13 ноября 2025 г. на луче № 2

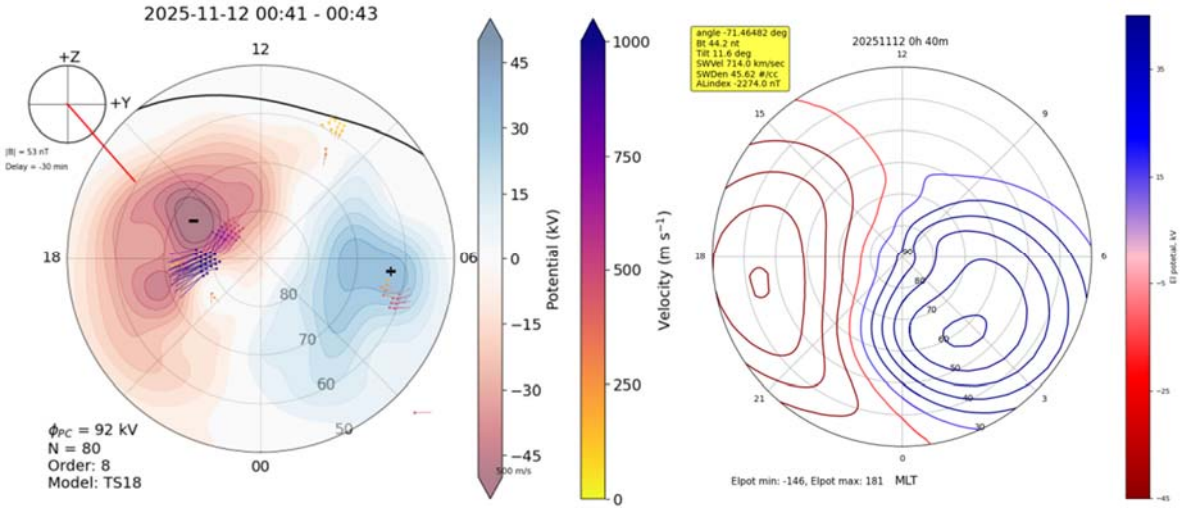

Рис. 3. Электрический потенциал по моделям TS18 (слева) и Веймера (справа)

На рис. 3 слева изолиниями показано распределение электрического потенциала в Северном полушарии Земли по модели TS18, а цветом — его потенциал в киловольтах (красный — отрицательный, синий — положительный). Черная линия описывает границу области конвекции Хеппнера — Майнарда. Точками отмечены данные КВ-радаров, стрелки указывают направление движения МИН, а цвет (длина стрелки) — их скорость. В верхнем левом углу красным отрезком показан вектор ММП, длина которого определяется напряженностью этого поля ($|B|$) в нТл. Из рис. 3 видно, что вектор направлен в сторону –Z (южное направление ММП) и +Y, это вызывает эффективное пересоединение силовых линий и интенсивную двухъячеистую конвекцию. В нижнем левом углу рисунка приведен блок выходных параметров ионосферной модели: Φ_{PC} — разность потенциалов между центрами положительного и отрицательного вихрей; N — количество точек данных (например, векторов скорости от КВ-радаров), которые использовались в алгоритме аппроксимации для построения этой конкретной карты; Order — порядок сферических гармоник (полиномов Лежандра), использованных при математическом разложении для сглаживания и аппроксимации двумерного поля потенциала.

На рис. 3 справа изолинии показывают распределение ЭП по модели Веймера. В верхнем левом углу приведены все параметры, которые использовались при расчете. В нижнем левом углу указаны значения максимального и минимального потенциала, исходя из них разность электрических потенциалов составляет 327 кВ, что значительно выше, чем на рисунке слева.

Исследования показывают, что значения электрического поля в модели Веймера существенно выше (иногда в 2–3 раза), чем в TS18, особенно это заметно во время геомагнитных бурь [Orr, 2023]. Это объясняется тем, что модель Веймера изначально построена по спутниковым данным. Фиксируемые спутниками локальные, резкие и мелкомасштабные всплески электрического поля вносят огромный вклад в итоговую дисперсию и увеличивают общую амплитуду поля в статистической модели. В то время как модель TS18 базируется на данных наземных КВ-радаров сети SuperDARN. Радар усредняет скорость дрейфа плазмы, сглаживая кратковременные локальные пики напряженности электрического поля.

Сравнивая положения максимумов положительного и отрицательного потенциалов на обоих рисунках, можно заметить также их смещение на правом рисунке в ночную область северной полусферы. Скорее всего, это связано с ошибками в построении потенциала по модели Веймера. Но для подтверждения этого требуется проведение дополнительного исследования, выходящего за рамки данной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было косвенно установлено, что во время геомагнитной бури 10–13 ноября 2025 г. по данным канадских и российских радаров авроральная область расширилась на магнитные широты экваториальнее секторов регистрации указанных КВ-радаров. На главной фазе бури отсутствует сигнал от земного рассеяния и фиксируется интенсивный сигнал ионосферного рассеяния. Все вместе это свидетельствует о том, что в этот период в секторах КВ-радаров электронная концентрация была существенно ниже, чем в спокойных условиях за день до начала бури.

В других работах по исследованию моделей электрического потенциала Веймера и TS18, прослеживается хорошая согласованность в спокойных условиях, но во время бури эта согласованность нарушается. Значения разности электрического потенциала в модели Веймера и TS18 отличаются в 2.8 раза во время бури. Эта особенность также наблюдается в данном исследовании и зависит от того, какие данные использует модель — спутников или радаров.

Несогласованность центров вихрей положительного и отрицательного потенциалов, возможно, связана с тем, что не учитывается 30-минутная задержка данных ММП в модели Веймера, которая учитывается в модели TS18.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Chisham G., Lester M., Milan S.E., et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions // Surv. Geophys. 2007. V. 28, N 1. P. 33–109.

Danskin D.W. HF auroral backscatter from the E and F regions. Ph.D. thesis, University of Saskatchewan. Saskatoon, 2004. 206 p.

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1994. V. 99, N A4. P. 5771–5792.

Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., et al. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection // Space Sci. Rev. 1995. V. 71, N 1–4. P. 761–796.

Kustov A.V., Weimer D.R. SuperDARN-detected plasma convection vortices and the global plasma convection // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1998. V. 103, N A6. P. 11,653–11,663.

Laundal K.M., Richmond A.D. Magnetic Coordinate Systems // Space Sci. Rev. 2017. V. 206, N 1–4. P. 27–59.

Orr L., Grocott A., Walach,M.-T., et al. A quantitative comparison of high latitude electric field models during a large geomagnetic storm // Space Weather. 2023. V. 21, e2022SW003301.

Shepherd S.G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, N 9. P. 7501–7521.

Thomas E.G., Shepherd S.G. Statistical patterns of ionospheric convection derived from mid-latitude, high-latitude, and polar SuperDARN HF radar observations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2018. V. 123. P. 3196–3216.

Weimer D.R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2005. V. 110, N A5, A05306.

Yasyukevich Y., Danilchuk E., Beletsky A. et al. The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm: From the Sun to the Earth // Sensors. 2026. V. 26, N 5, 1490. 28 p.

URL: https://radar-software-toolkit-rst.readthedocs.io/ (дата обращения 25.05.2026).

URL: https://pydarn.readthedocs.io/ (дата обращения 25.05.2026).

URL: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/ (дата обращения 25.05.2026).