

*А. Ю. Белинская<sup>1✉</sup>, А. А. Боровко<sup>1</sup>*

## **Возмущения ионосферного радиоканала в период декабрь 2024 г. – январь 2025 г.**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** На основе данных наклонного зондирования, полученных на трассе Норильск – Новосибирск с октября 2023 г. до января 2025 г., анализируются вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) в различных геофизических условиях. Получены суточные вариации максимально наблюдаемой частоты для каждого месяца года в магнитоспокойные периоды при высоком уровне солнечной активности. В осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя, что приводит к более высоким значениям МНЧ. Исследованы особенности проявления гелиогеофизического взаимодействия в декабре 2024 г. и январе 2025 г. Проведенный анализ показал, что в периоды сильной и умеренных магнитных бурь ионосферные возмущения приводят к сильным вариациям МНЧ распространения КВ-радиоволн и даже к отсутствию прохождения радиоволн на субавроральной трассе в вечерние и ночные часы LT.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, радиоканал, магнитосфера, высокоширотная ионосфера, наклонное зондирование ионосферы, главный ионосферный провал.

*A. Yr. Belinskaya<sup>1✉</sup>, A. A. Borovko<sup>1</sup>*

## **Disturbances of ionospheric radio channel the period December 2024 – January 2025**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** This paper presents the results of analysis of oblique ionospheric sounding data obtained with continuous chirp signal on the subauroral path Norilsk-Novosibirsk. Variations in the maximum observed frequencies (MOF) are analyzed under various geophysical conditions from October 2023 to January 2025. Diurnal variations of the maximum observed frequency for each month of the year during magnetically calm periods with a high level of solar activity have been obtained. In the autumn-winter season, reflection from the sporadic layer is observed at night, which leads to higher MOF values. The features of the manifestation of heliogeophysical interaction in December 2024 and January 2025 are investigated. The analysis showed that during periods of severe and minor magnetic storms ionospheric disturbances lead to strong variations in the propagation frequency of HF radio waves and even to the absence of radio waves passing along the subauroral path in the evening and night hours of LT.

**Keywords:** radio wave propagation, radio channel, magnetosphere, high-latitude ionosphere, oblique ionospheric sounding, main ionospheric trough

### ***Введение***

Известно, что распространение радиосигналов во многом зависит от электронной концентрации вдоль пути их следования. Одним из крупномасштабных неоднородных образований в субавроральной ионосфере является главный ионосферный провал (ГИП). Он представляет собой устойчивую область, распо-

ложенную на широтах от 52 до 64 градусов. В этой области концентрация электронов значительно ниже, чем в окружающих регионах.

Местоположение ГИП может меняться в зависимости от времени суток и геомагнитной активности. В спокойных условиях его ширина составляет около 10 градусов. Однако при возмущениях ширина провала уменьшается, а его границы смещаются к экватору.

Экспериментальные данные, полученные на трассах наклонного зондирования, проходящих через область ГИП, показывают, что характеристики КВ-сигналов существенно меняются. Наблюдаются уменьшения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) и дополнительные сигналы с задержками, превышающими задержки основных мод распространения. Такие сигналы могут возникать из-за отражения от полярной стенки провала и иметь достаточно высокий уровень, чтобы влиять на работу систем связи. Несмотря на то, что исследования характеристик распространения КВ-радиоволн в области ГИП проводятся уже много лет, обзор работ можно найти, например, в [1, 2], интерес к этой теме не ослабевает. Это связано с тем, что важно знать, как меняются параметры КВ-радиосигналов на трассе, проходящей через область ГИП, как в спокойных, так и в возмущённых условиях. Кроме того, данные наклонного зондирования могут дать информацию для диагностики состояния ионосферы вдоль трассы распространения радиосигналов.

В этой работе проведён анализ изменений МНЧ на трассе Норильск – Новосибирск в различных геофизических условиях.

### ***Максимальная наблюдаемая частота на трассе Норильск – Новосибирск***

С октября 2023 г. в Новосибирске установлен новый ЛЧМ–ионозонд, который позволяет проводить наблюдения методом наклонного зондирования. В том числе, с частотой 5 мин ведутся непрерывные наблюдения на трассе Норильск – Новосибирск, которая ориентирована практически в меридиональном направлении, и северный участок трассы примыкает к области главного ионосферного провала (средняя точка трассы имеет координаты 62,2° с.ш. и 85,2° в.д.). Данная радиотрасса функционирует на базе сети ЛЧМ-ионозондов (разработка ИСЗФ СО РАН [3]). За период 2023-2024 гг. была накоплена база данных, которая позволила оценить суточные вариации МНЧ для магнитоспокойных дней [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>] в каждом месяце года (рис. 1, по UT). Для каждого момента времени были посчитаны среднеквадратичные отклонения.

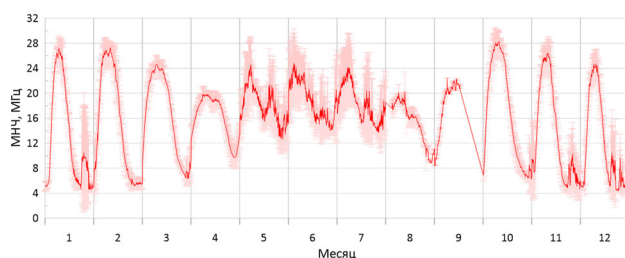


Рис. 1. Суточные вариации МНЧ (красная линия) на трассе Норильск – Новосибирск со средним квадратичным отклонением для каждого момента времени (светлые линии), LT = UT+5,5

Появление максимума МНЧ наблюдается в околополуденное время суток (12-14 часов по местному времени), минимум – в полночь (00-02 часов по местному времени). В осенне-зимний период значения достигают 28 МГц, в весенне-летний период – 24 МГц, а минимумы – 5 МГц и 13 МГц соответственно.

В летний период наблюдается уменьшение диапазона значений МНЧ. Также проявляются сильные вариации в течение суток. Общий характер среднесуточного хода МНЧ теряется, появляются 2 пика. Возможно, подобные изменения связаны с изменением критических частот слоёв ионосферы и образованием слоя F1 в летний сезон.

В осенне-зимний сезон (в частности, с октября по январь) в ночное время в районе 20-21 UT наблюдается отражение от спорадического слоя, расположенным на высотах 130-150 км (рис. 2).

Также стоит обратить внимание на апрель, август и сентябрь, где наблюдается резкое понижение суточного максимума МНЧ на 4-6 МГц (до 21%). В апреле прослеживается размытие пика и его постепенное разделение на 2 составляющие, диапазон значений уменьшается на 3 МГц (23%). Для августа ситуация противоположная – происходит слияние пиков в один, диапазон значений увеличивается на 6 МГц (100%). Прямолинейный участок суточного хода МНЧ в сентябре (с 12:33 до 23:58 UT) обусловлен недостаточностью данных.

Среднеквадратичное отклонение для осенне-зимнего периода в ночные часы достигает 8 МГц, для летнего сезона – 6 МГц, в остальное время не превышает 3 МГц (рис. 1, светлые линии). Таким образом, для трассы Норильск – Новосибирск вариации МНЧ в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях.

Проведенный анализ максимальных наблюдаемых частот, полученных на меридиональной трассе Норильск – Новосибирск, при высоком уровне солнечной активности, но в спокойных геомагнитных условиях показал:

- отличие суточного хода для различных сезонов;
- вариации в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях;
- в осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя;
- апрель, август и сентябрь характеризуются пониженными значениями суточного максимума.

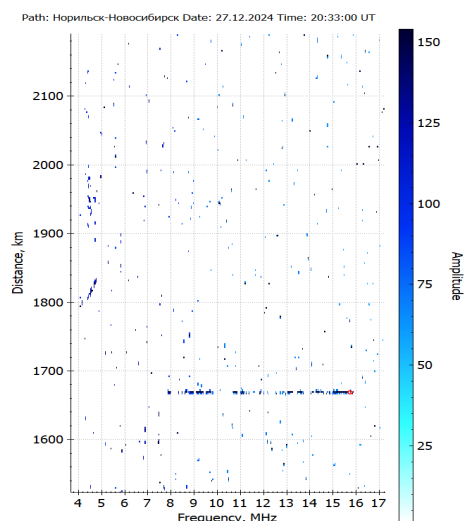


Рис. 2. Отражение радиосигнала на трассе Норильск – Новосибирск 27.12.2024 в 20:33 UT. Красной точкой отмечена МНЧ = 15,6 МГц

### *Гелиогеофизическая обстановка в декабре 2024 г. – январе 2025 г.*

Анализ космической погоды в декабре 2024 г. – январе 2025 г. проводился на основе параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) перед фронтом околоземной ударной волны [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/)], которые представлены на рис. 3. Информация о гелиосферных источниках бурь доступна на ресурсе [[http://www.solen.info/solar/old\\_reports/](http://www.solen.info/solar/old_reports/)]. В тексте используются следующие обозначения:  $V_{sw}$  – скорость СВ;  $P_{sw}$  – динамическое давление СВ;  $|B|$  – модуль ММП;  $B_z$  GSM – компонента ММП в солнечно-магнитосферной системе координат GSM, которая перпендикулярна эклиптике (положительное значение соответствует направлению на север, отрицательное – на юг). СМЕ (coronal mass ejection) – выброс корональной массы.

В рассматриваемый период наблюдается достаточно спокойная космическая погода, за исключением двух периодов: середина декабря 2024 г. и начало января 2025 г. (см. рис 3).

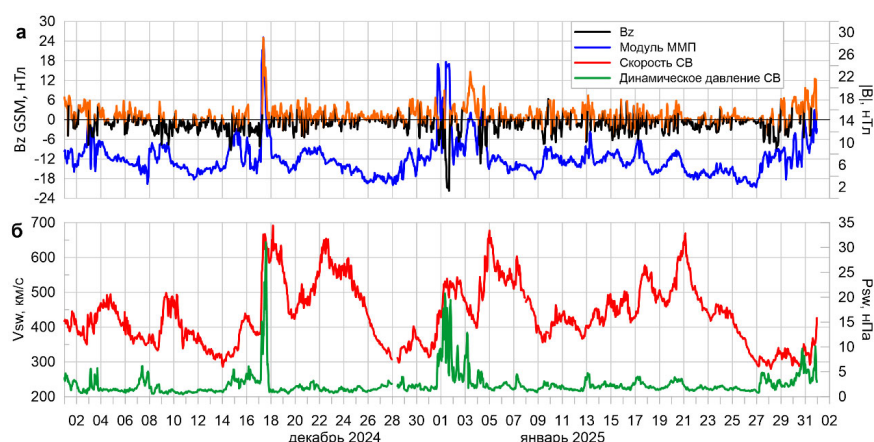


Рис. 3. Параметры межпланетного магнитного поля (а) и солнечного ветра (б). Для вертикальной компоненты ММП  $B_z$  оранжевым цветом обозначены положительные значения, а черным – отрицательные

17 декабря наблюдается прохождение через орбиту Земли межпланетной структуры с большим значением  $|B|$  (до 28 нТл) и направленной к северу вертикальной компонентой ММП ( $B_z \sim 25$  нТл). В это же время резко возрастает  $V_{sw}$  (от  $\sim 400$  км/с до 700 км/с) и  $P_{sw}$  (от  $\sim 5$  нПа до 30 нПа). Вероятнее всего это является отголоском слабого, медленного, асимметричного СМЕ 14 декабря, пик которого пришелся на 17:29 UT. Возмущения в этот период носят краткосрочный характер.

С 31 декабря по 4 января наблюдался ускоренный поток солнечного ветра (СВ), вызванный СМЕ в 04:34 UT (после вспышки M2), в 17:08 UT (M3.3) 29 декабря и в 02:00 UT 1 января.

31 декабря до 15 UT скорость СВ была 400-340 км/с,  $B_z$  колебалась от -6 до +4 нТ. В 15-17 UT  $B_z$  достигла -17 нТ, а скорость СВ увеличилась до 490 км/с.

1 января к 05 UT скорость СВ возросла с 450 до 550 км/с,  $B_z$  варьировалась от -23 до +25 нТ.

2 января до 13 UT скорость СВ оставалась 540-500 км/с,  $B_z$  колебалась от -11 до +5 нТ. После 13 UT скорость начала снижаться, к 22 UT 3 января достигнув 400 км/с,  $B_z$  – от -5 до +15 нТ.

3 января в 22:00  $B_z$  усилилась до -15 нТ, скорость СВ начала возрастать. К 14:00 4 января достигла 670 км/с, к 21:00 – 700 км/с,  $B_z$  колебалась от -11 до +5 нТ.

С 21 UT 4 января скорость СВ начала снижаться, достигнув к концу периода 480 км/с.  $B_z$  колебалась от -7 до +6 нТ.

Наблюдался проход через орбиту Земли области СВ с высокими значениями  $|B|$  (до 24 нТл),  $P_{sw}$  (до 21 нПа),  $V_{sw}$  (до 520 км/с) и вертикальной компонентой  $B_z$ , направленной сначала на юг (-21 нТл), затем на север (15 нТл).

Анализ магнитных бурь проводился на основе индексов: локального  $K$  для геомагнитной обсерватории Новосибирск (ИНГГ СО РАН), планетарного  $K_p$  [<https://kp.gfzpotdam.de/en/data>] и  $Dst$  [[https://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/dst\\_realtime/index.html](https://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/dst_realtime/index.html)].

Геомагнитная обстановка в декабре 2024 г. – январе 2025 г. представлена на рис. 4.

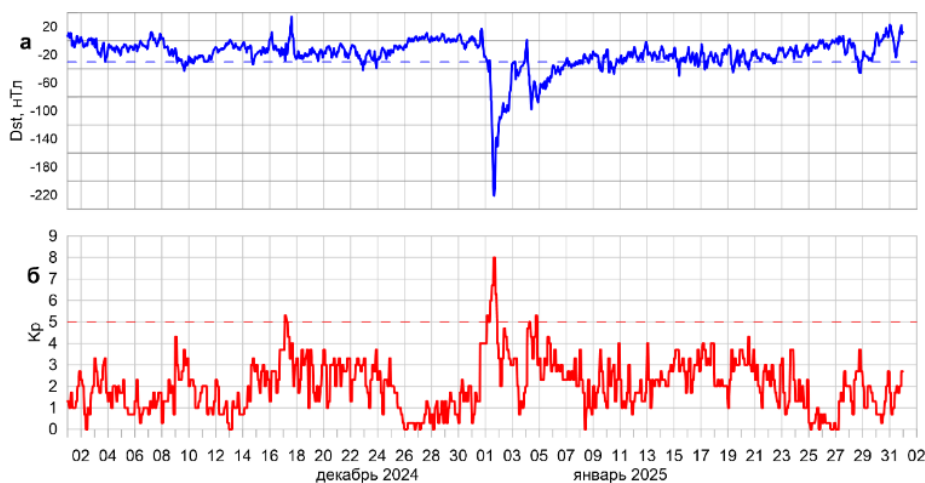


Рис. 4. Геомагнитные индексы в декабре 2024 г. – январе 2025 г.  
(а) –  $Dst$ ; (б) – планетарный трехчасовой индекс  $K_p$

Хорошо видно, что изменение в межпланетном пространстве в середине декабря вызвало небольшое магнитное возмущение, что согласуется с тем, что только во время экстремальных явлений с высокими скоростями СВ возможно появление геомагнитной бури ( $K_p = 5$  или выше) с северным ВЗ. События начала января вызвали достаточно бурную реакцию геомагнитного поля. Были отмечены 3 большие бури, информация о которых представлена в табл. 1.

Таблица 1

Магнитные бури, зарегистрированные в Новосибирске

| Дата       | Начало бури | Конец бури | Максимум K | Максимум Dst |
|------------|-------------|------------|------------|--------------|
| 31.12.2024 | SSC* 16:22  |            | 4          | -23          |
| 01.01.2025 |             | 00:00      |            |              |
| 01.01.2025 | 03:00       | 23:00      | 8          | -221         |
| 02.01.2025 | SSC 06:30   | 22:00      | 4+         | -102         |

\*SSC (Storm Sudden Commencement) – внезапное начало геомагнитной бури.

Малая буря 31 декабря имела внезапное начало в 16:22 UT и закончилась к концу дня. В это время наблюдались сильные полярные сияния над европейской частью России. Затем 1 января была зафиксировано очень большая магнитная буря с постепенным началом в 03 UT, которая продлилась 20 часов и имела максимум в 15-17 UT.

*Ионосферные возмущения в период геомагнитных бурь*

По экспериментальным наблюдениям, полученным в северо-восточном регионе России во время слабых геомагнитных бурь, наблюдавшихся в осенний период 2018–2020 гг. в минимуме солнечной активности, обнаружено, что даже во время слабых бурь уменьшение МНЧ в дневные часы достигало 25–35%, а ночью – 40–50%. [4, 5]. В результате исследования [6] данных наклонного зондирования ионосферы на субавроральных трассах Магадан – Иркутск и Норильск – Иркутск было установлено, что при усилении поля магнитосферной конвекции на ионограммах обнаруживаются дополнительные диффузные отражения. Было выявлено соответствие между вариациями МНЧ и пространственной локализацией двух ключевых ионосферных структур: главного ионосферного провала и экваториальной границы зоны диффузных электронных высыпаний.

Учитывая гелиогеофизическую обстановку в декабре 2024 г – январе 2025 г. и расположение радиотрассы Норильск – Новосибирск, можно ожидать больших возмущений на ней в период 31.12.24 – 04.01.25. Поэтому для анализа были привлечены данные по МНЧ с 30.12.24 по 03.01.25, включая даты с невозмущенным состоянием околоземного пространства.

На рис. 5 приведены вариации МНЧ за рассматриваемый период на фоне средних значений в магнитоспокойные дни декабря и января. Там же обозначены граничные моменты магнитных бурь.

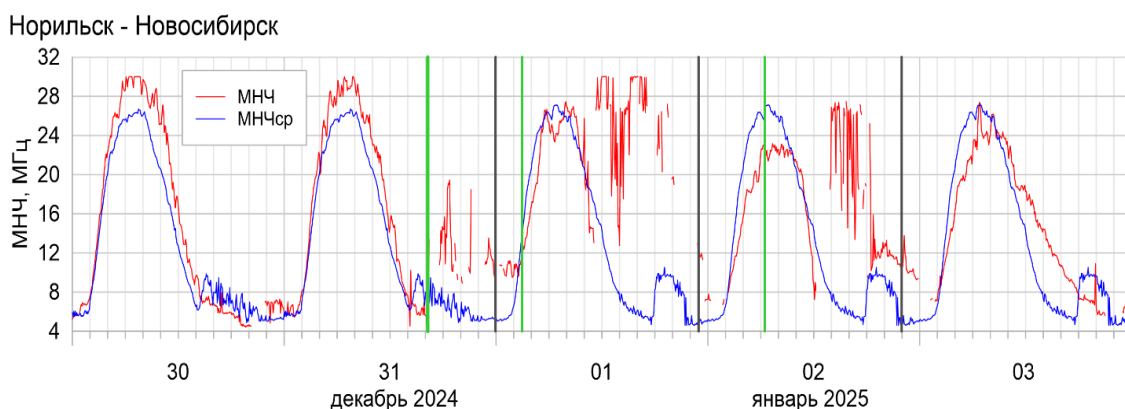


Рис. 5. Суточные вариации МНЧ на трассе Норильск – Новосибирск за период 30.12.2024 – 03.01.2025. Зеленая линия соответствует началу магнитной бури, а серая – окончанию

Анализируемый период наблюдений попадает на максимум солнечного цикла, поэтому МНЧ радиотрассы в дневные часы превышала верхнюю границу частотного диапазона зондирования (30 МГц), например, 30 декабря 04-14 UT, 1 января 12-16 UT. В вечерние и ночные часы местного времени в невозмущенные дни наблюдается уровень МНЧ ниже средних в магнитоспокойные дни.

Совсем другая картина наблюдается в период сильной и двух умеренных бурь. Высыпания электронов низких энергий приводят к возрастанию концентрации электронов в F-области внутри и вблизи полярной стенки ГИП [7, 8], что может объяснять наблюдаемые повышенные значения МНЧ (вплоть до 30 МГц) на трассе Норильск – Новосибирск 31 декабря, 1 и 2 января в вечерние и ночные часы LT, когда регистрировались дополнительные сигналы с задержками и МНЧ, превышающими соответствующие средние значения в невозмущенных условиях. Стоит отметить, что наибольшие отклонения от среднего были именно в максимуме магнитных бурь. Кроме того, в конце бури 1 января и середине бури 2 января наблюдались длительные интервалы «black out». Причем, чем больше было магнитное возмущение, тем больше были отклонения от значений в магнитоспокойные дни. Дневные же значения имели тенденцию к пониженным значениям по сравнению с невозмущенным уровнем.

### ***Заключение***

Получены по экспериментальным данным суточные зависимости МНЧ от месяца наблюдения для магнитоспокойных условий при высоком уровне солнечной активности. Вариации МНЧ в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях. В летний период наблюдается уменьшение диапазона значений МНЧ на фоне сильных вариаций в течение суток. В осенне-зимний сезон в ночное время наблюдается отражение от спорадического слоя, расположенного на высотах 130-150 км. Такое отражение приводит к более высоким значениям МНЧ, нарушающим плавный ход суточных вариаций. Эти результаты можно использовать для оценки вариаций МНЧ при различных ге-

лиогеофизических условиях. Кроме того, они могут быть эталонами для проверки методов прогнозирования максимально применимой частоты.

Исследованы особенности проявления гелиогеосферного взаимодействия в декабре 2024 г. и январе 2025 г. по данным наклонного зондирования на радиотрассе Норильск – Новосибирск, северный участок которой примыкает к области главного ионосферного провала. Проведенный анализ показал, что в периоды сильной и умеренных магнитных бурь ионосферные возмущения приводят к сильным вариациям МНЧ распространения КВ-радиоволн и даже к отсутствию прохождения радиоволн на субавроральной трассе в вечерние и ночные часы LT.

### ***Благодарности***

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Для обработки ионограмм наклонного зондирования использовалась программа «IonoView» (ИСЗФ СО РАН, свидетельство № 2024618431 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11 апреля 2024 года).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.В. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
2. Мизун Ю.Г. Полярная ионосфера. – Ленинград: Наука, 1980. – 216 с.
3. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 24-31.
4. Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования // Солнечно-земная физика. – 2004. – Вып. 5. – С. 124-127.
5. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 245-256.
6. Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А. Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 91-105.
7. Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуденном секторах // Космические исследования. – 1977. – Т. 15. – №. 3. – С. 421-434.
8. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. – М.: Наука, 1988. – 232 с.

© А. Ю. Белинская, А. А. Боровко, 2025