



ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ G4/G5-КЛАССА В 25 СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ НА ИОНОСФЕРУ И ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Е.И. Данильчук^{1,2}, Ю.В. Ясюкевич^{1,2}, А.М. Веснин¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Актуальность

- Геофизические эффекты геомагнитных бурь: изменение электронной концентрации в ионосфере, расширение границ аврорального овала и экваториальной ионосферной аномалии, появление ионосферных неоднородностей электронной концентрации различных масштабов и др.;
- Эффекты геомагнитных бурь на качество технических систем (включая энергосистемы, железнодорожные системы, радиооборудование, глобальные навигационные системы и др.);
- Очень сильные и экстремальные геомагнитные бури возникают редко ($K_p=9$: SC20 – 3, SC21 – 2, SC22 – 1, SC23 – 2, SC24 – 0).

Цель

Исследовать влияние геомагнитных бурь G4/G5-класса в 25 солнечном цикле на ионосферу и качество высокоточного GPS-позиционирования.

Данные и методика обработки

1) ROTI (Rate Of TEC Index)

$$ROTI = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} \right)^2 \right\rangle - \left\langle \frac{\Delta I}{\Delta t} \right\rangle^2}$$

2) Глобальные ионосферные карты научного центра UQRG (2.5°/5° пространственное разрешение по ширите/долготе)

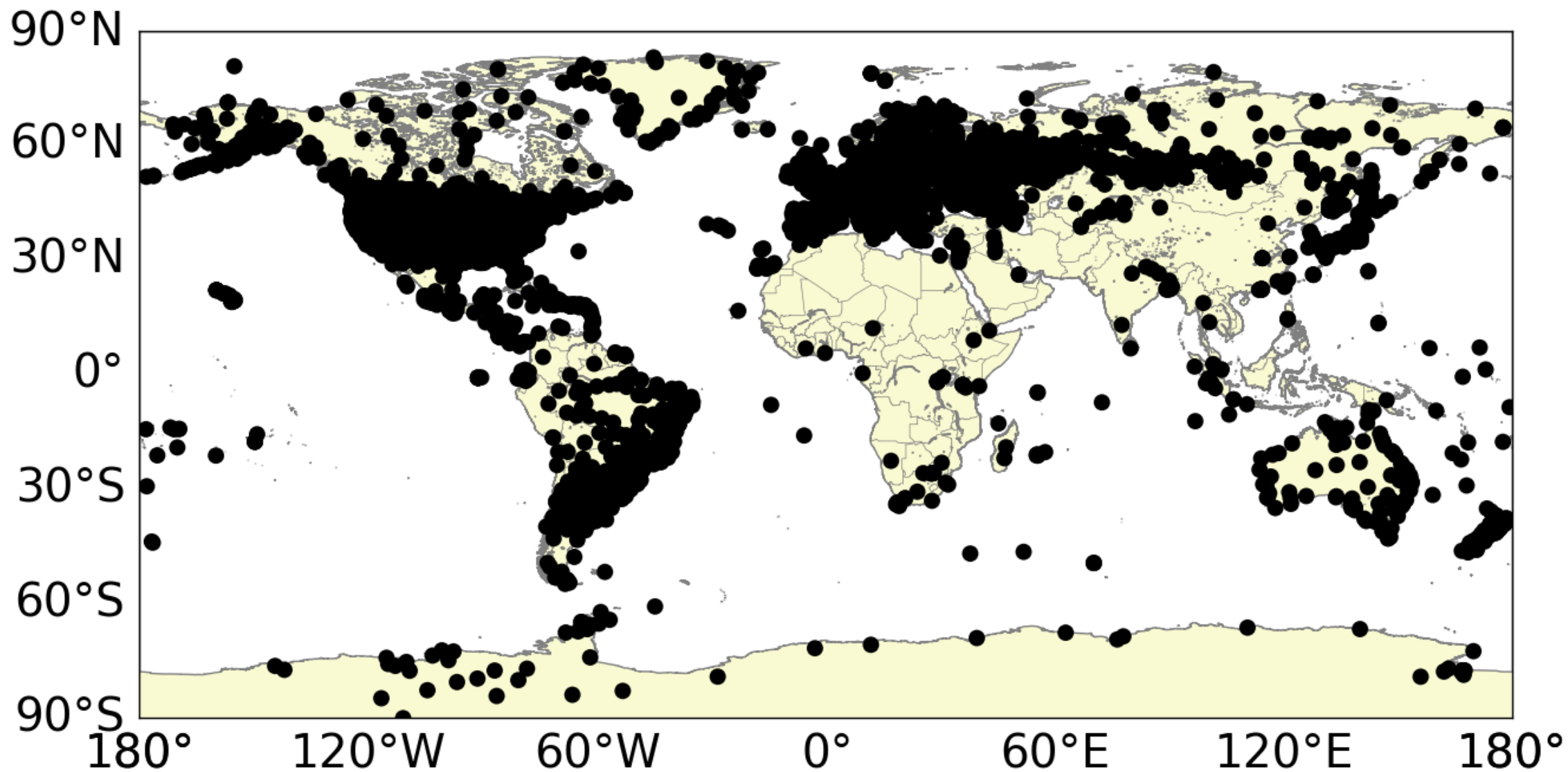
3) Программное обеспечение GAMP для расчета 3D ошибки позиционирования в режиме kinematic PPP

$$\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

where ΔX , ΔY , ΔZ – отклонение измеряемой координаты от 23-часового медианного значения в трёх направлениях.

4) Онлайн-сервис SIMuRG (<https://simurg.space/>)

Месторасположение приемников ГНСС

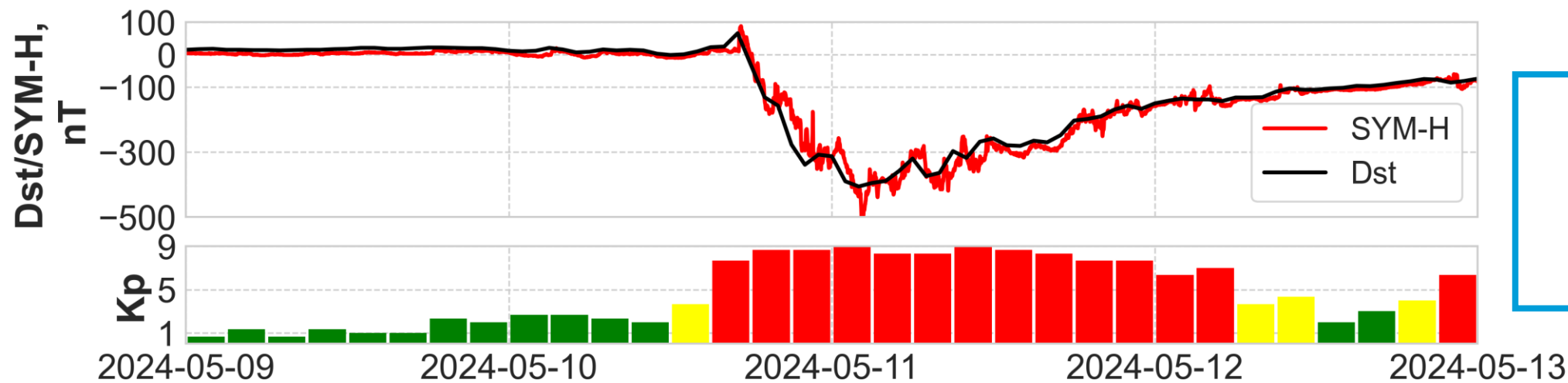


Геомагнитные бури G4/G5-класса

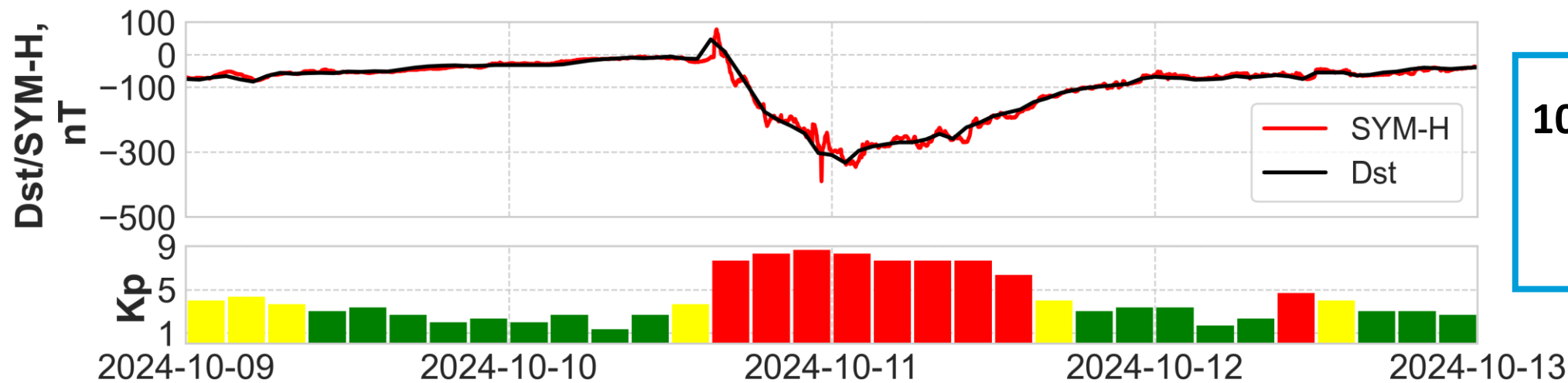
- G4-класс (очень сильная буря): $K_p=8$, $Dst < -200$ нТл
- G5-класс (экстремальная буря): $K_p=9$, $Dst < -350$ нТл

| Дата | Класс | K_p | Dst_{min} , нТл |
|-----------------------|-------|-------|-------------------|
| 10-11 мая 2024 г. | G5 | 9 | -406 |
| 10-11 октября 2024 г. | G4 | 9- | -333 |
| 23-24 апреля 2023 г. | G4 | 8+ | -213 |
| 1-2 января 2025 г. | G4 | 8 | -212 |
| 11-12 августа 2024 г. | G4 | 8 | -183 |
| 23-24 марта 2023 г. | G4 | 8 | -163 |
| 24-25 марта 2024 г. | G4 | 8+ | -128 |

Геомагнитные условия в мае и октябре 2024 г.



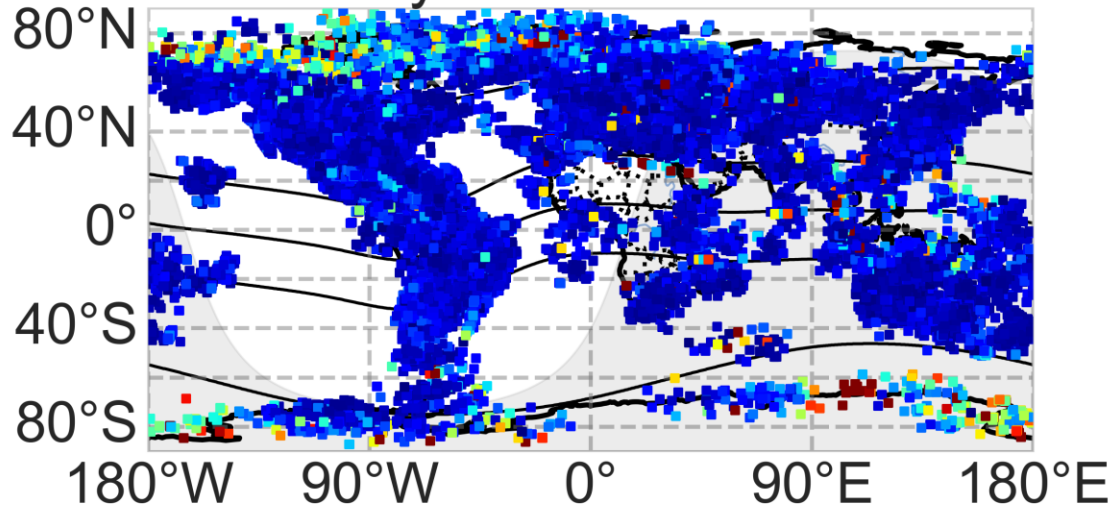
10-11 мая 2024
Kp = 9
Dst_{min} = -406 нТл



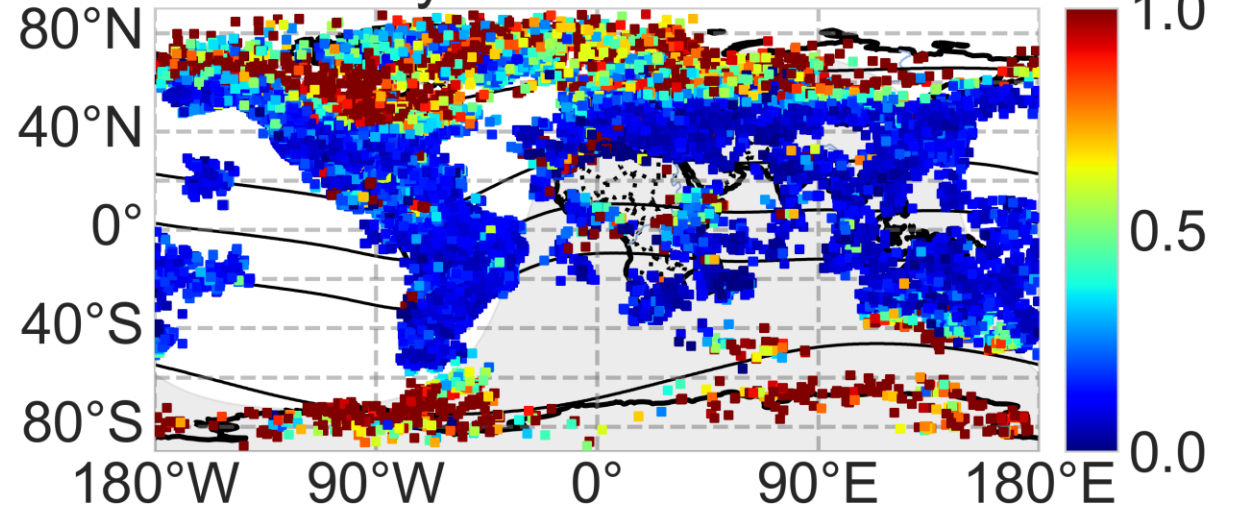
10-11 октября 2024
Kp = 9-
Dst_{min} = -333 нТл

Карты ROTI (май 2024 г.)

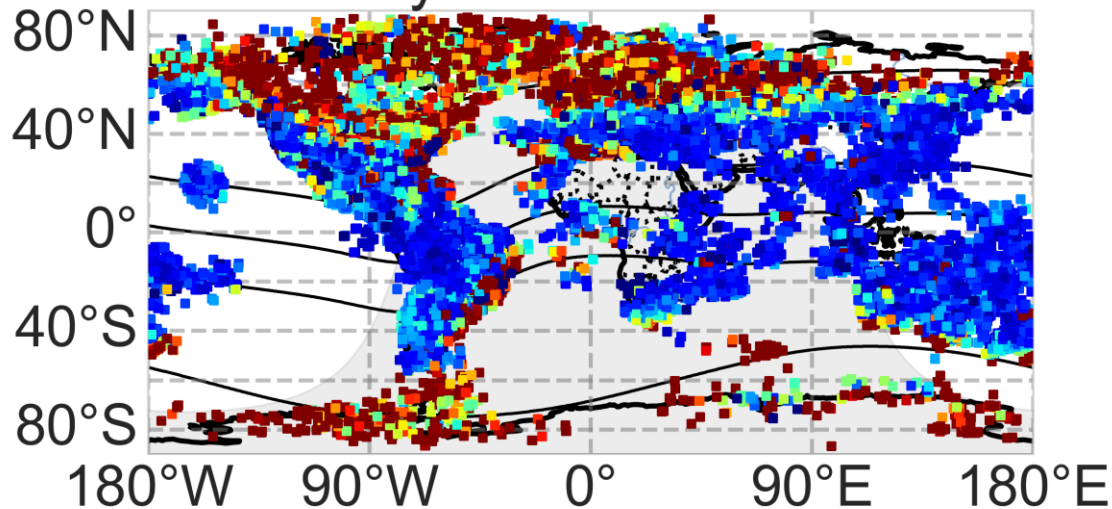
10 May 2024 17:00:00 UT



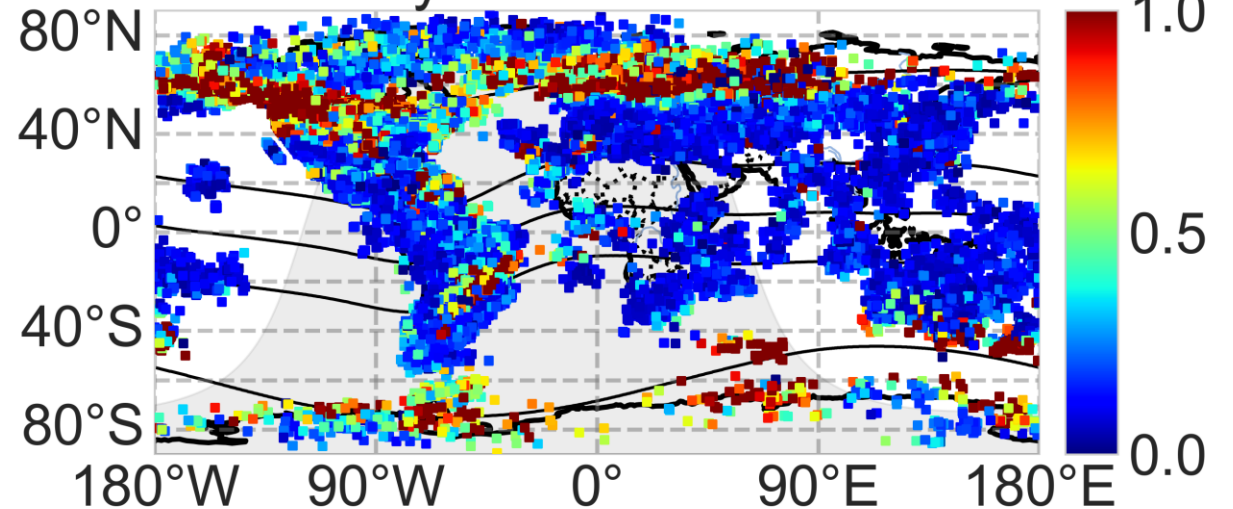
10 May 2024 20:00:00 UT



10 May 2024 23:00:00 UT



11 May 2024 02:00:00 UT

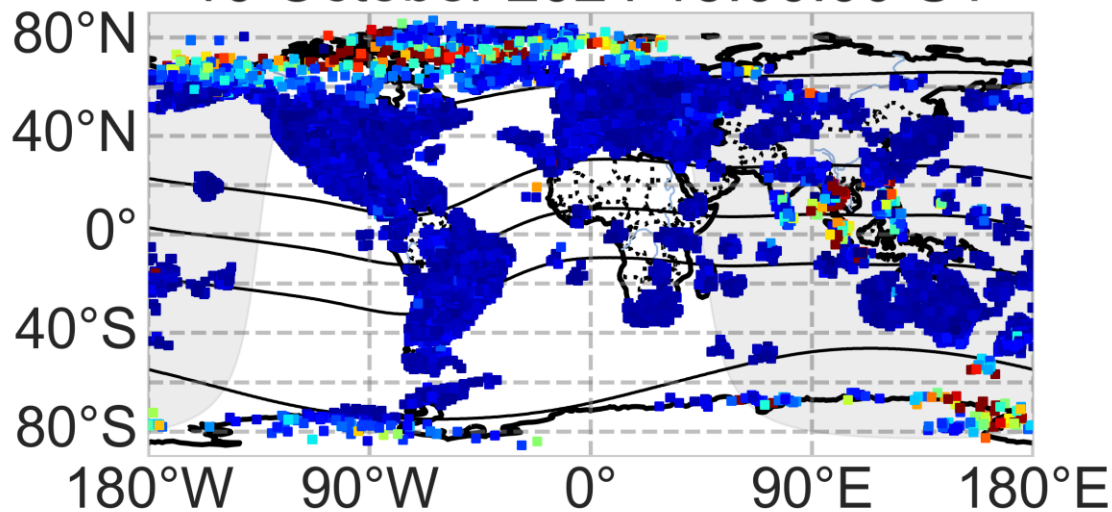


ROTI, TECU/min

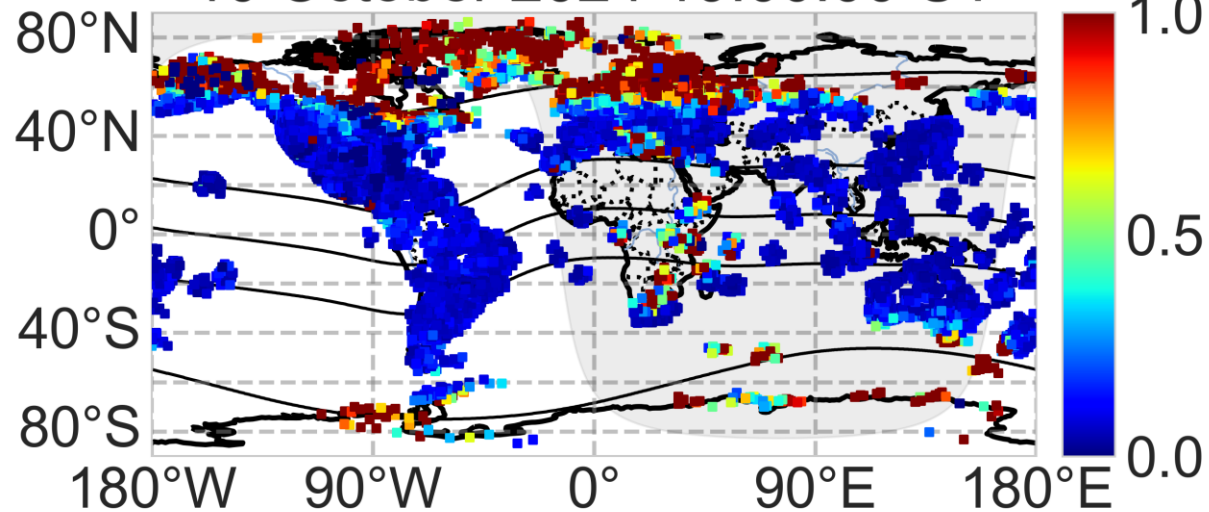
ROTI, TECU/min
7

Карты ROTI (октябрь 2024 г.)

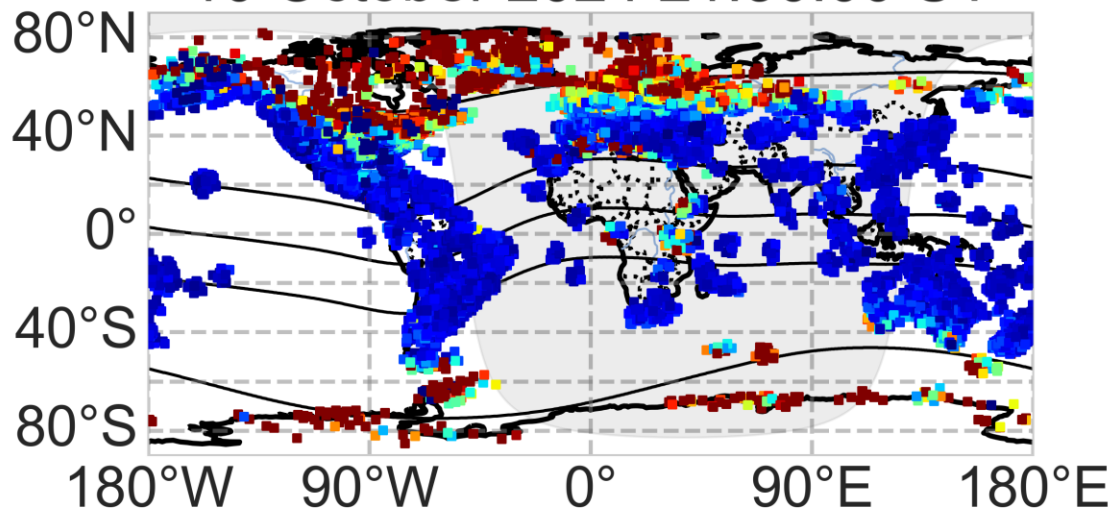
10 October 2024 15:00:00 UT



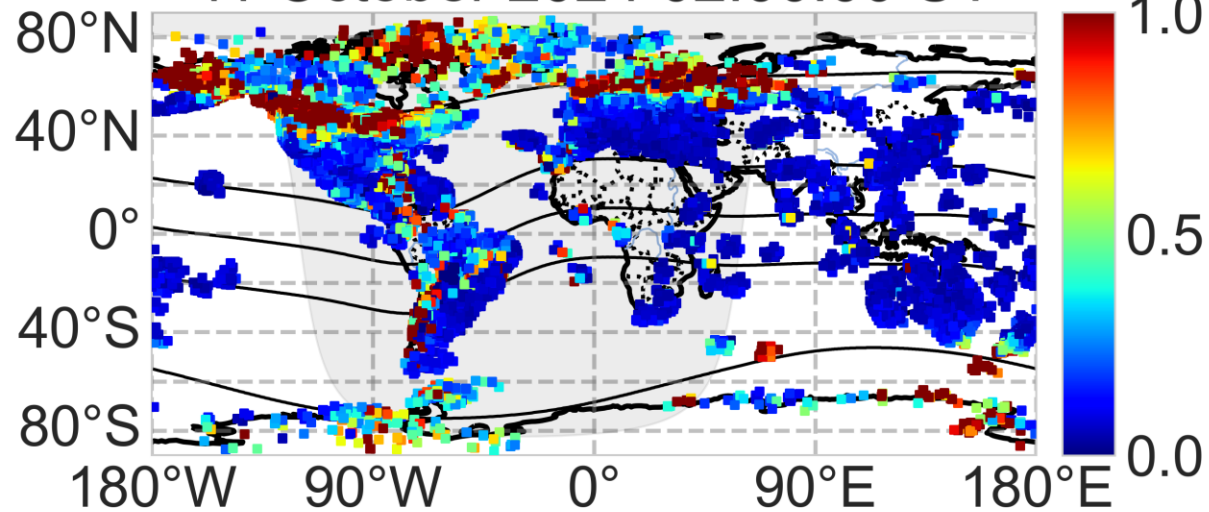
10 October 2024 19:00:00 UT



10 October 2024 21:30:00 UT



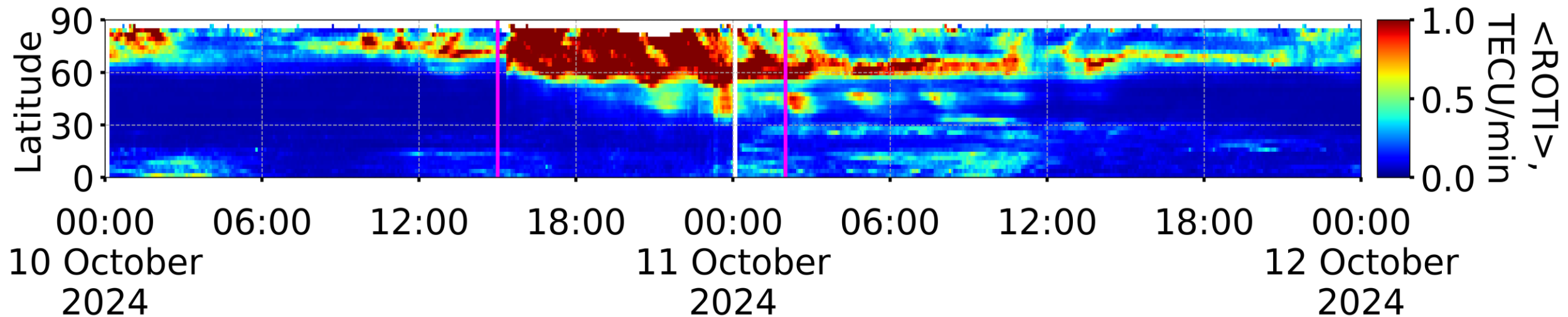
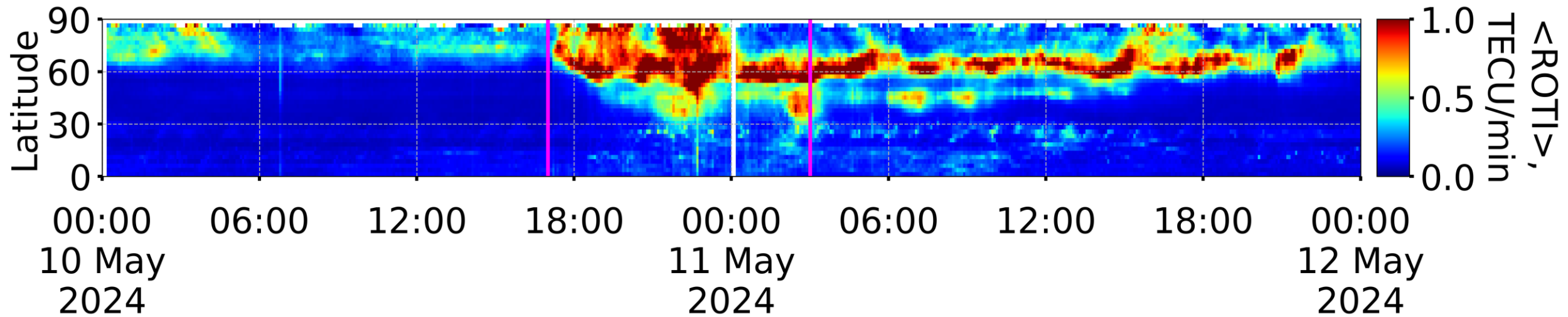
11 October 2024 02:00:00 UT



ROTI, TECU/min

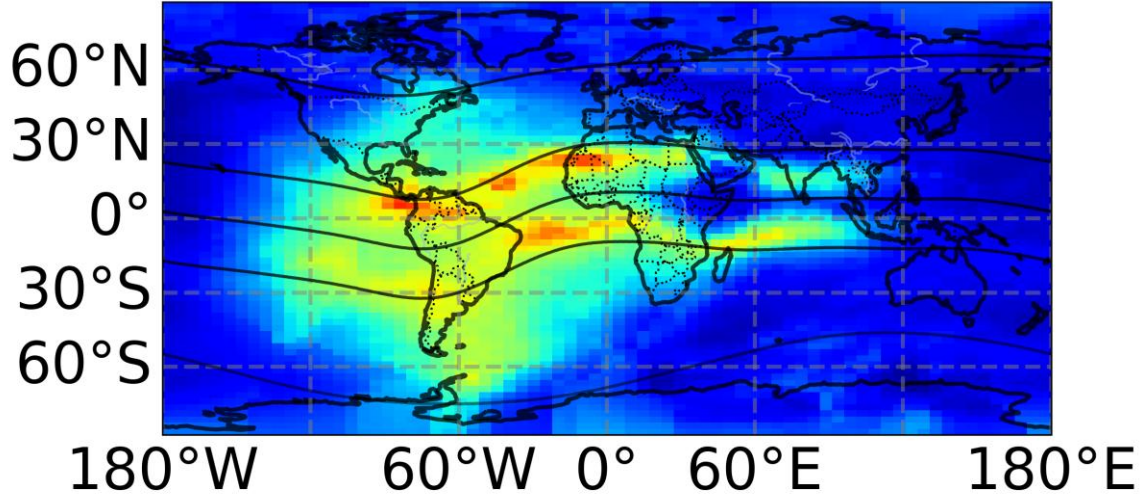
ROTI, TECU/min₈

Кеограммы ROTI

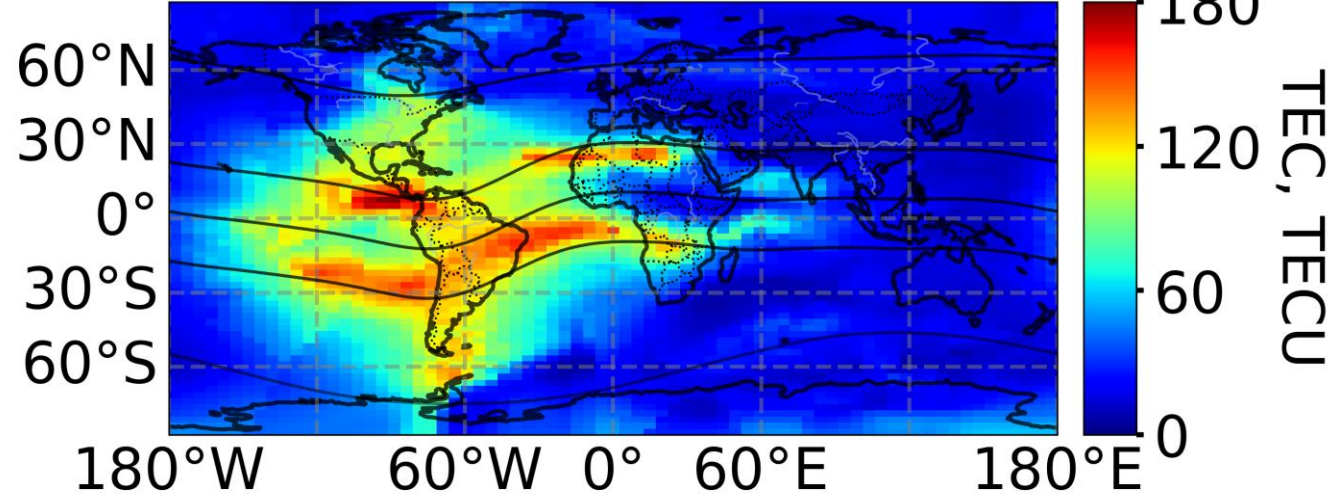


Карты ПЭС (октябрь 2024 г.)

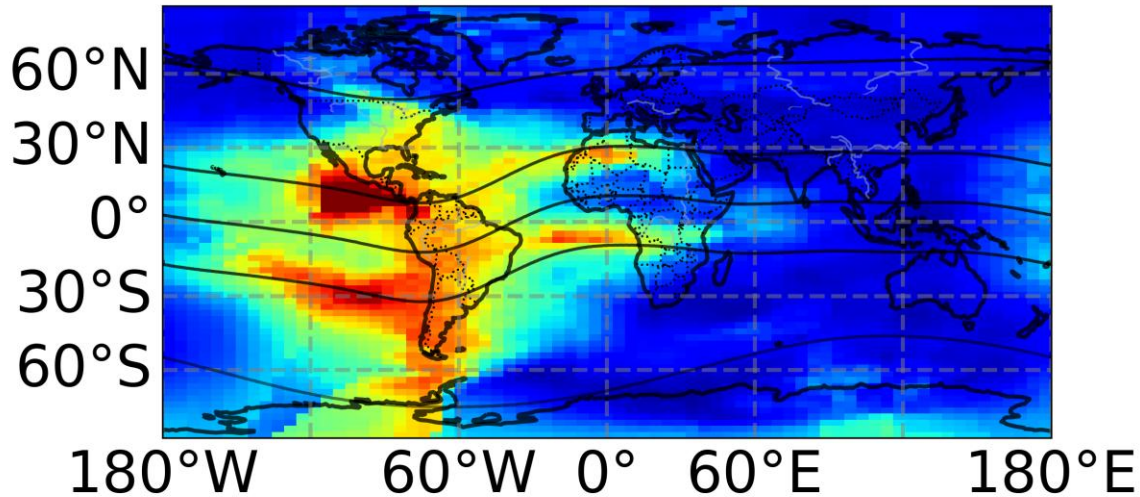
10 October 2024 17:00:00 UT



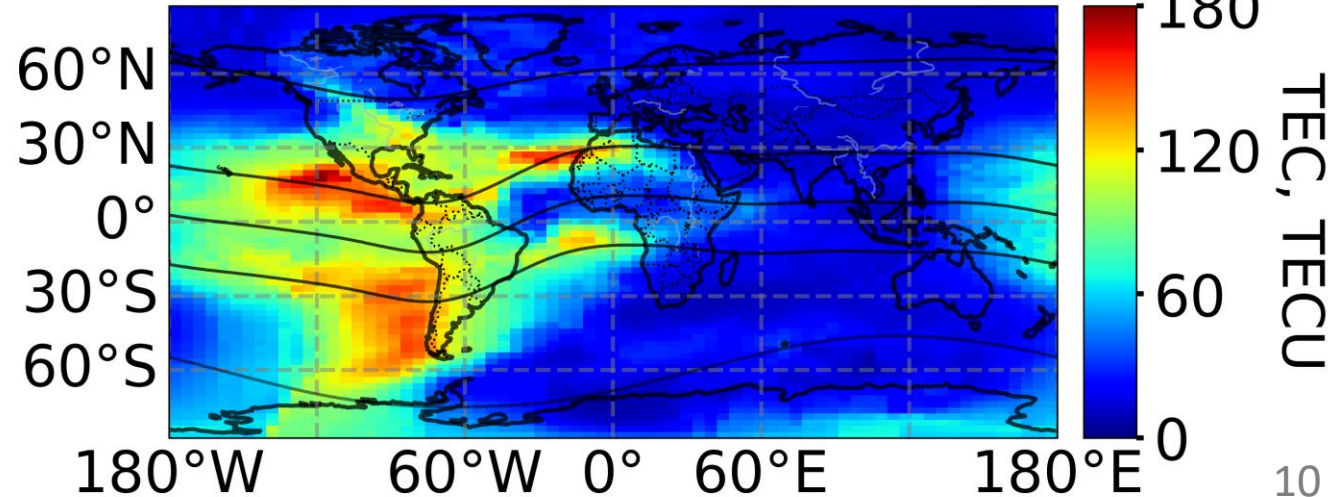
10 October 2024 18:30:00 UT



10 October 2024 20:00:00 UT

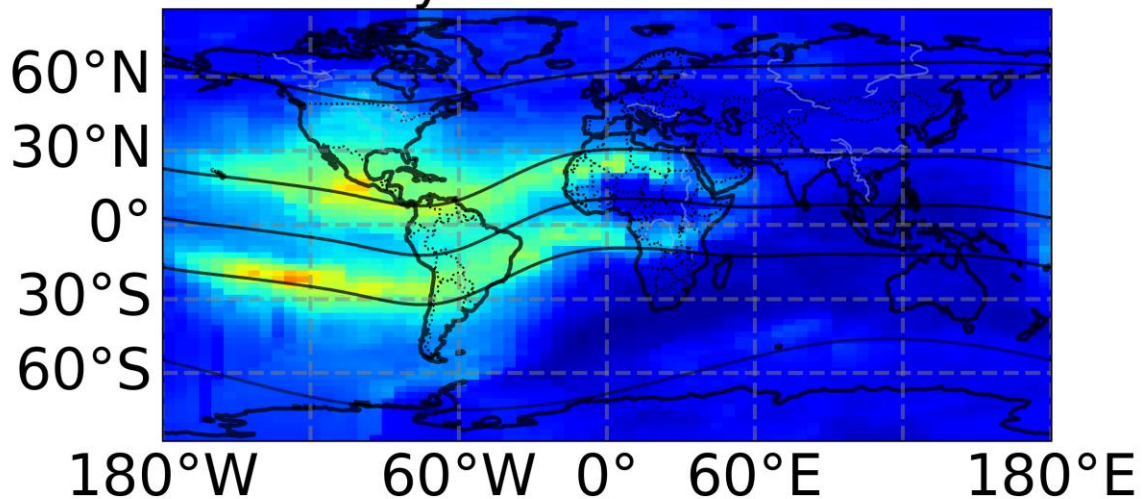


10 October 2024 21:30:00 UT

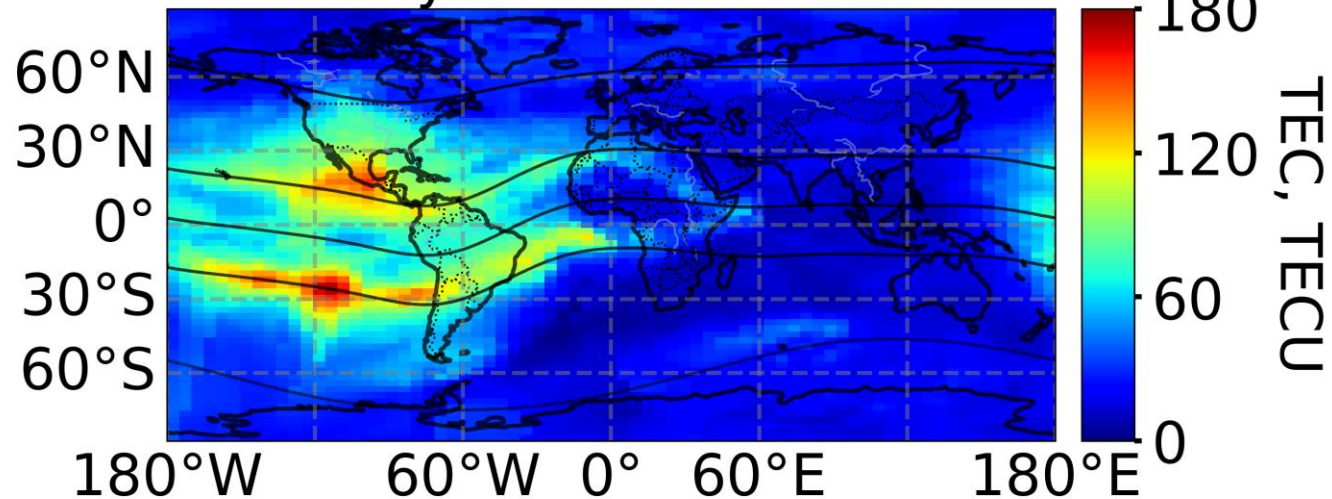


Карты ПЭС (май 2024 г.)

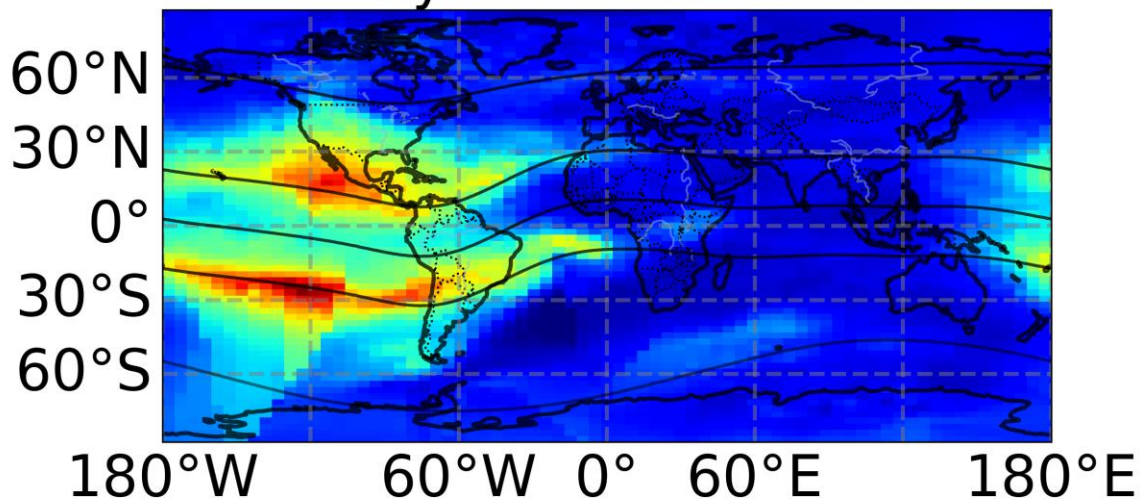
10 May 2024 19:00:00 UT



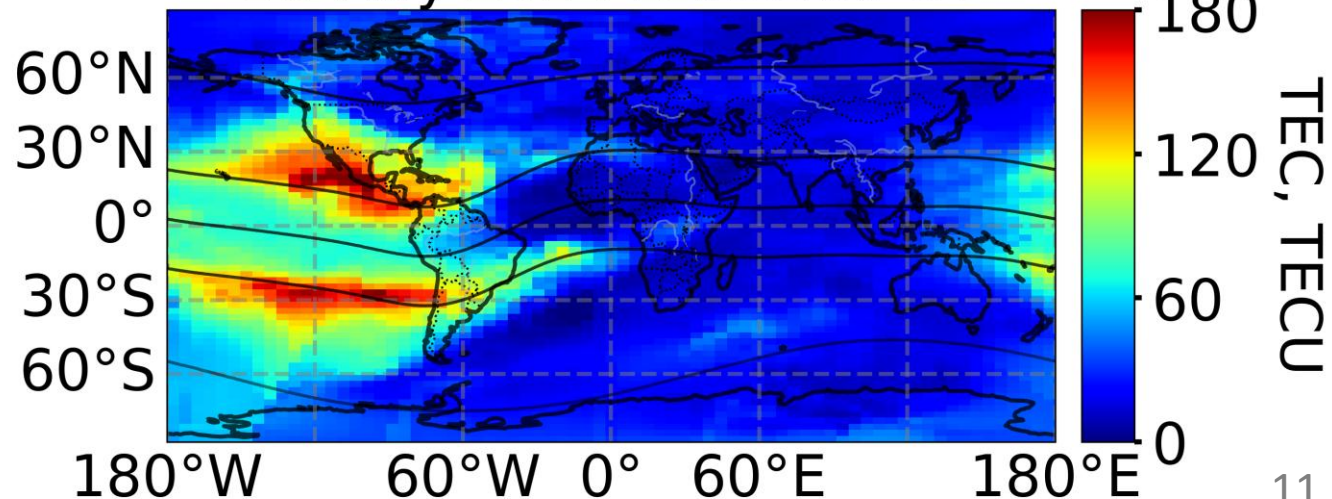
10 May 2024 20:00:00 UT



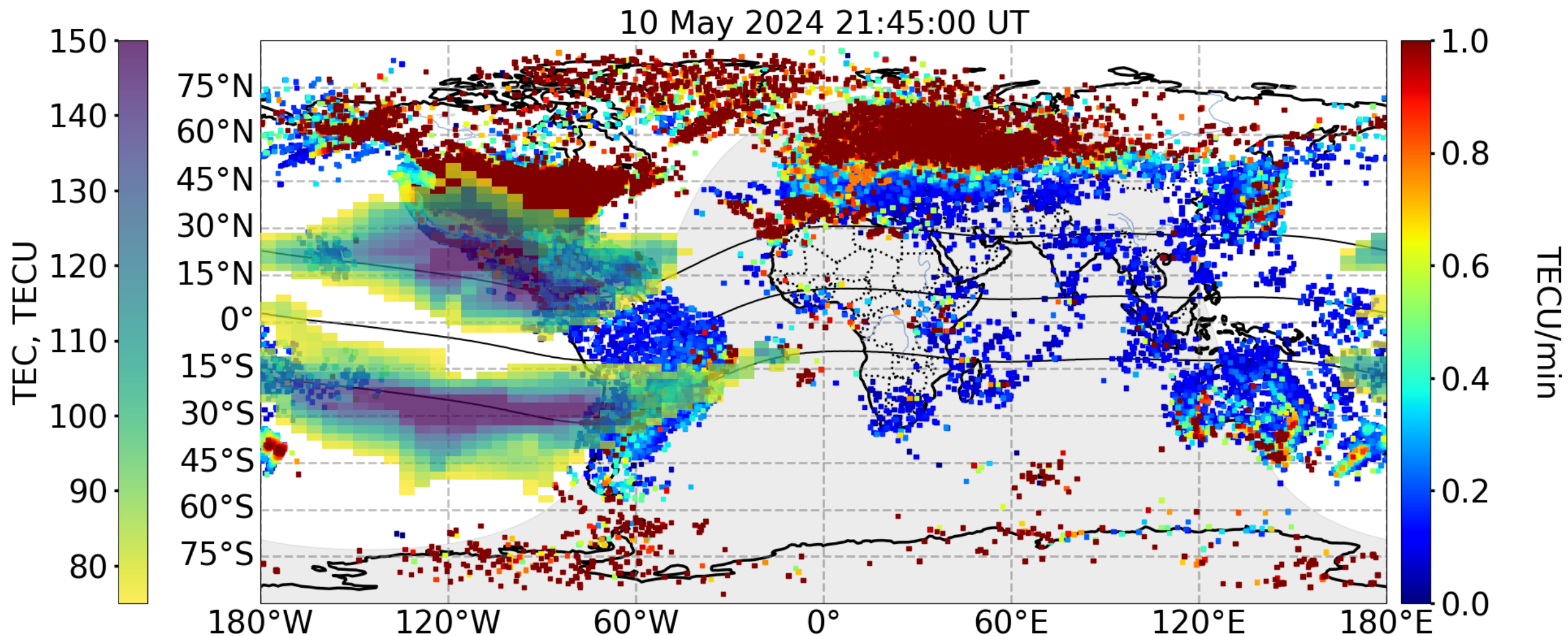
10 May 2024 21:00:00 UT



10 May 2024 22:00:00 UT

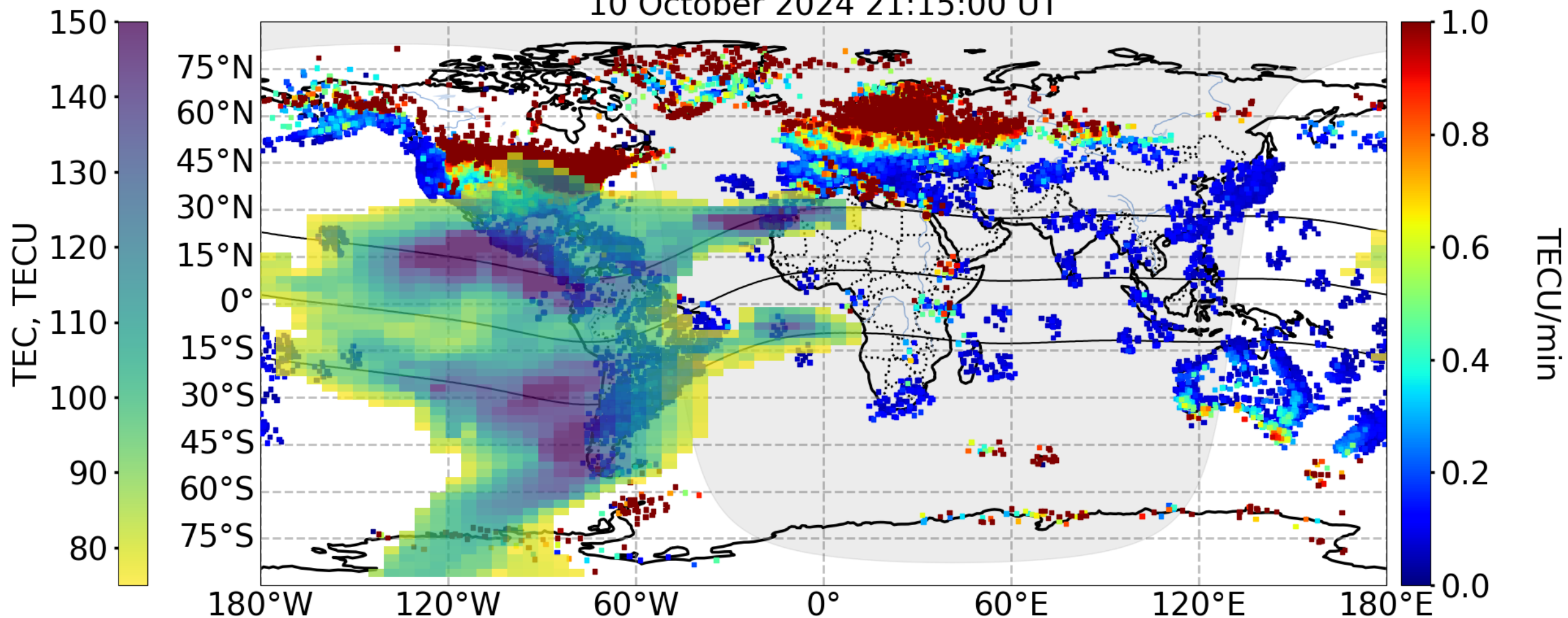


Пересечение границ аврорального овала и экваториальной аномалии (май 2024)



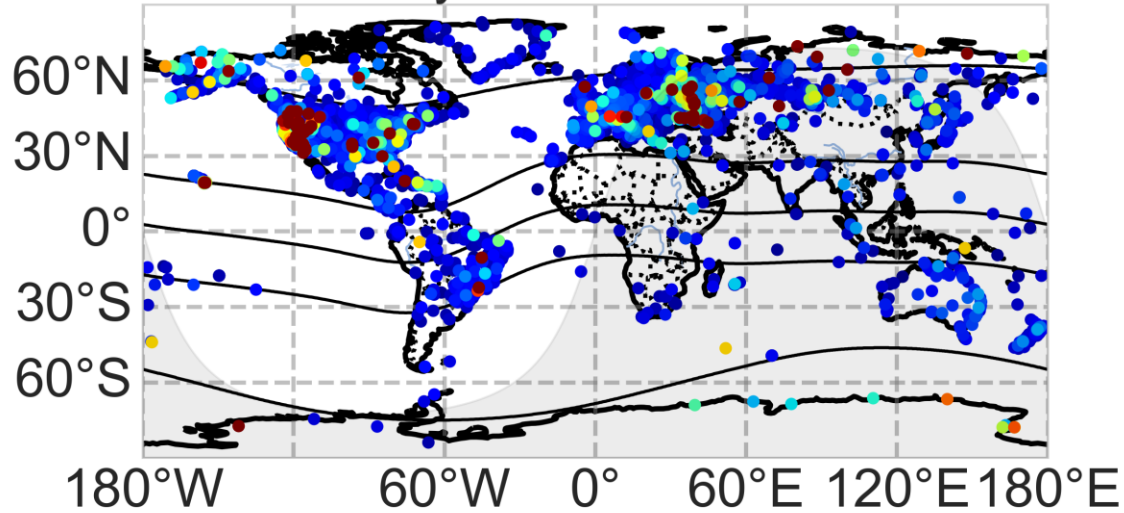
Пересечение границ аврорального овала и экваториальной аномалии (октябрь 2024)

10 October 2024 21:15:00 UT

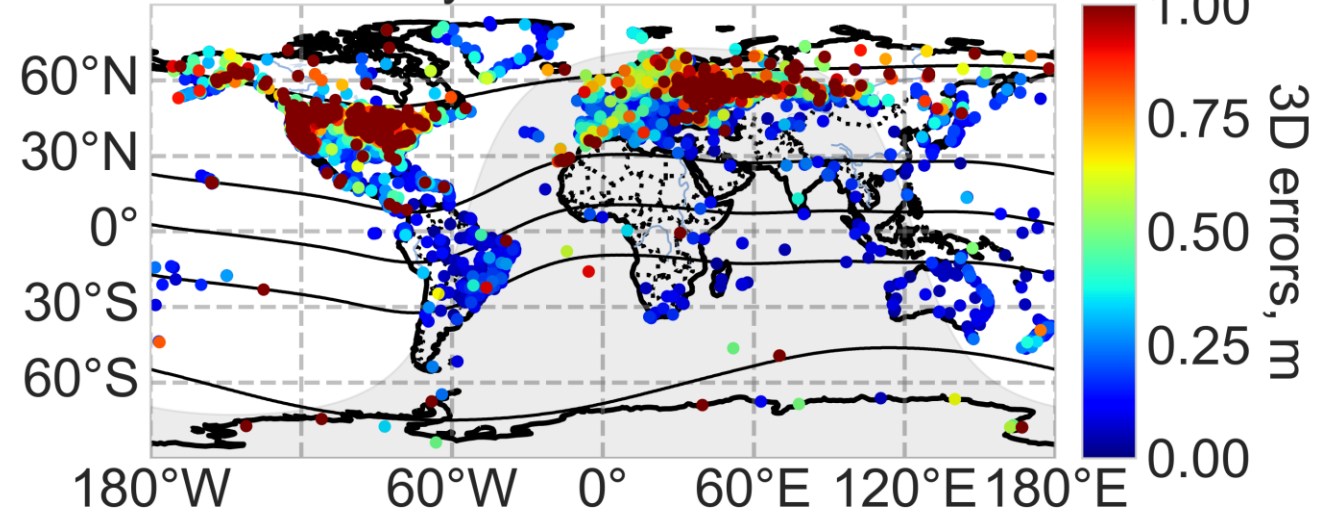


3D ошибки позиционирования

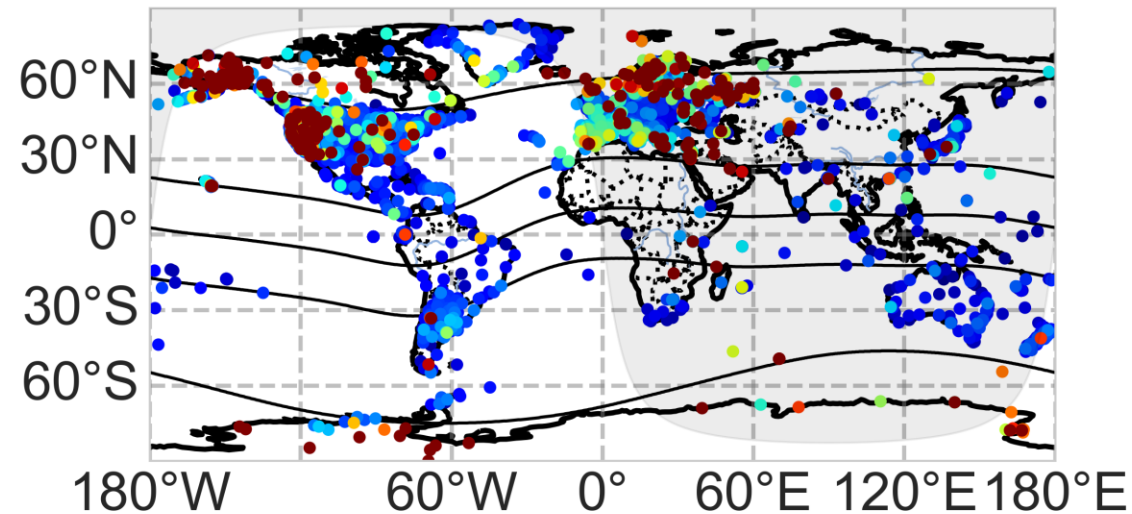
10 May 2024 18:00:00 UT



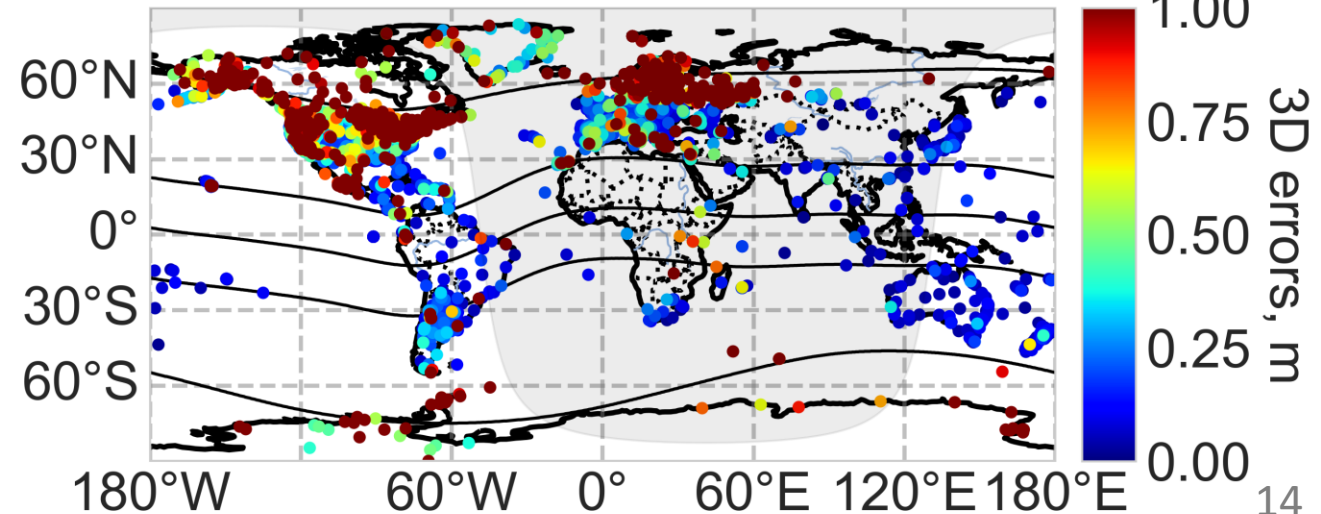
10 May 2024 21:45:00 UT



10 October 2024 18:00:00 UT



10 October 2024 21:15:00 UT



Заключение

- Исследованы очень сильные (G4-класс: $K_p=8$, $Dst < -200$ нТл) и экстремальные (G5-класс: $K_p=9$, $Dst < -350$ нТл) геомагнитные бури в 25 солнечном цикле.
- Во время главной фазы геомагнитных бурь границы аврорального овала расширились. Границы аврорального овала могли смещаться до 30° с.ш. в американском секторе и до 45° с.ш. в европейско-азиатском секторе. Значения ROTI достигли 2 TECU/мин.
- Гребни экваториальной аномалии усилились (до 200 TECU) и сместились в сторону полюсов в американском секторе.
- Встречные процессы распространения привели к уникальному явлению – пересечению границ аврорального овала и гребней экваториальной аномалии в Северной Америке. Такое пересечение наблюдалось во время геомагнитных бурь 10-11 мая и 10-11 октября 2024 г.
- Значения 3D ошибок позиционирования увеличились в 1,5-5 раз в области аврорального овала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>)

Спасибо за внимание!

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>)