



MURMANSK
ARCTIC
UNIVERSITY



Моделирование высокоширотной токовой системы ионосферы Земли

Борис Евгеньевич Прохоров¹,
Юлия Александровна Шаповалова^{1,2},
Олег Владимирович Золотов³ и
Юлия Владимировна Романовская³

1 Мурманский арктический университет, Лаборатория компьютерного моделирования околоземной среды, 183038 Мурманск, ул. Егорова, 15, Россия

2 Полярный геофизический институт, Лаборатория радиозондирования ионосферы, 183010, Мурманск, ул. Халтурина, 15, Россия

3 Мурманский арктический университет, Кафедра информационных технологий, 183010 Мурманск, ул. Спортивная, 13, Россия

Аннотация

Система электрических токов ионосферы Земли является частью глобальной электрической цепи. Эта система включает в себя так называемые продольные токи (Field Aligned Currents – FAC), которые текут между ионосферой и магнитосферой вдоль силовых линий геомагнитного поля и играют значительную роль при передаче магнитосферного воздействия в ионосферу. В совокупности ионосферная токовая система реагирует на изменения «внешних» факторов, таких как величина и ориентация межпланетного магнитного поля, параметры солнечного ветра и уровень солнечной активности. Кроме того, существенное влияние на данную систему оказывают «внутренние» факторы, такие как термосферное динамо нейтрального ветра, сезонность и UT-эффекты.

В настоящей работе рассматриваются два варианта задания продольных токов и выполняется численное моделирование полной ионосферной токовой системы для этих двух вариантов с помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model). В качестве моделей продольных токов использовались модель Iijima & Potemra и модель MFACE. Варианты соответствующих расчетов обозначены как UAM-IP и UAM-MFACE. Результаты моделирования показали, что вариант UAM-IP не позволяет задавать продольные токи независимо в каждом полушарии, в отличие от варианта UAM-MFACE. UAM-MFACE воспроизводит конфигурацию токов в ионосфере высоких широт лучше, чем UAM-IP. Кроме того, UAM-MFACE воспроизводит более реалистичную геометрию аврорального овала, но при этом данная версия модели потребовала расширенного перечня входных параметров, специальной пространственной сетки и меньший временной шаг.

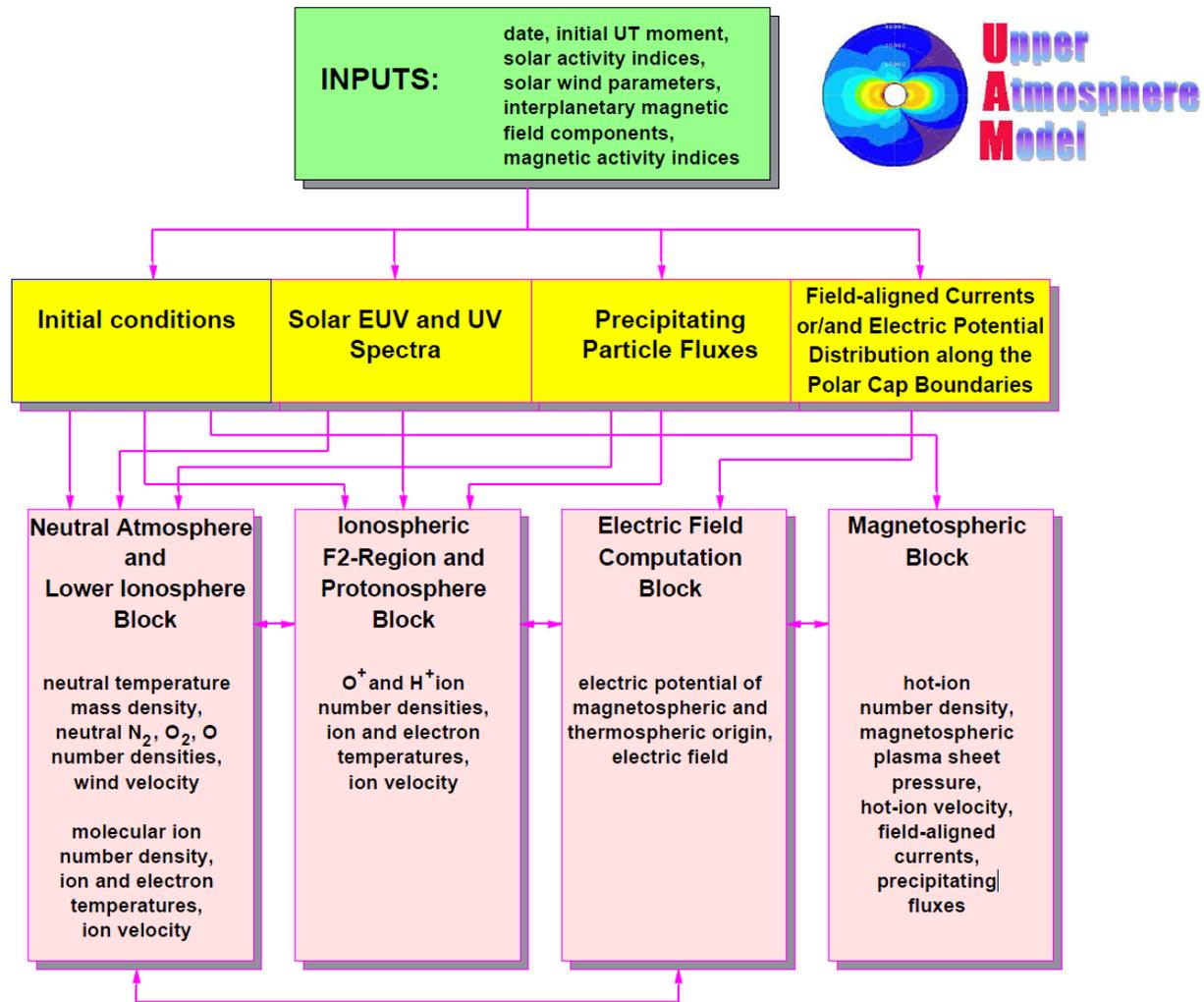


Рис. 1. Блок-схема глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model).

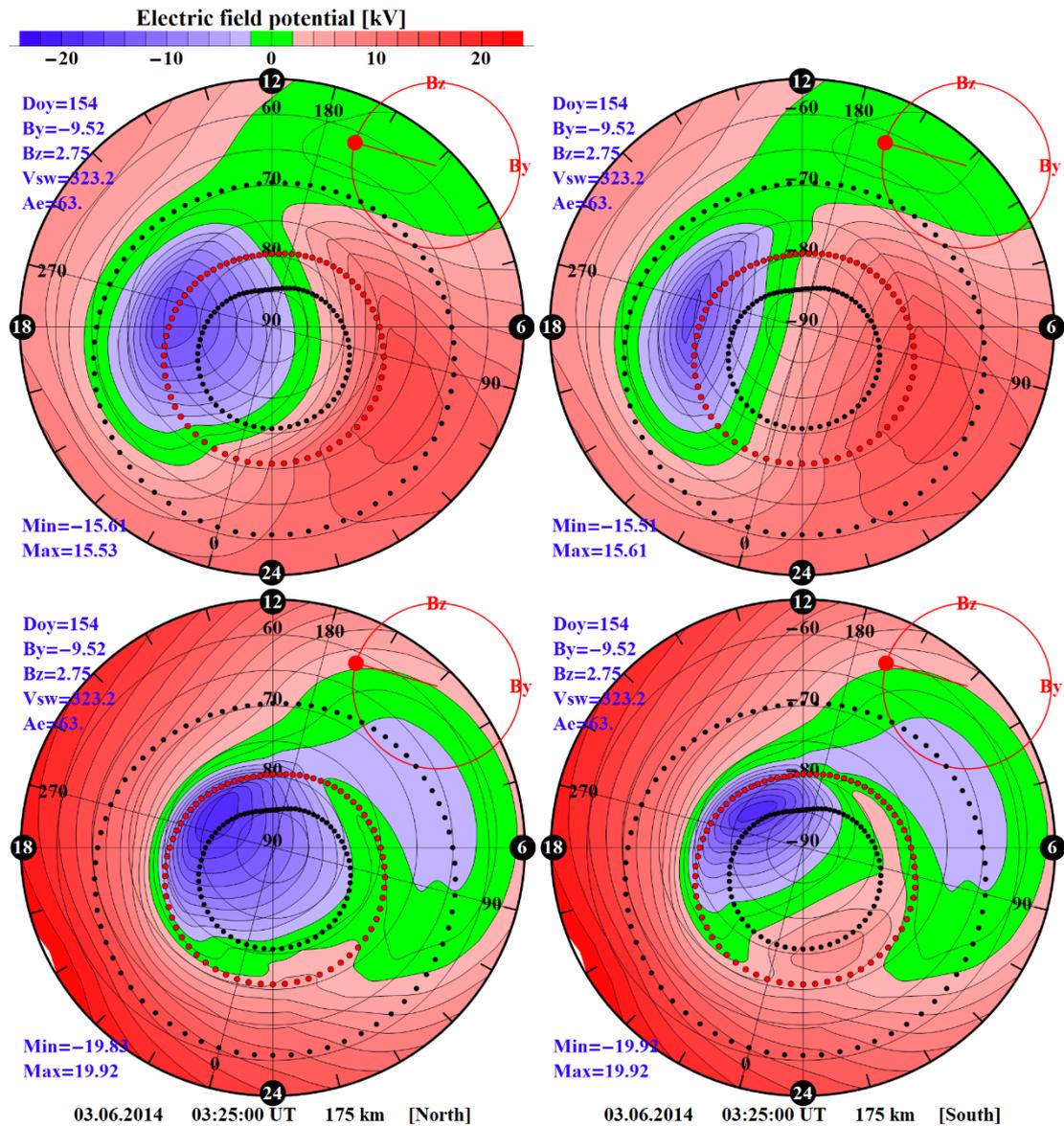


Рис. 2. Карты распределения значений электрического потенциала для 03:25:00 UT 03 июня 2014 г., рассчитанных с использованием моделей UAM-IP (верхняя панель) и UAM-MFACE (нижняя панель) для Северного (левая колонка) и Южного (правая колонка) полушарий. Все построения выполнены в солнечно-магнитной системе координат. Положение АСС отмечено красными точками. Черными точками обозначены границы продольных токов (как граница в направлении экватора, так и полюса). Границы АСС и продольных токов рассчитываются с помощью модели MFACE. Шаг цветового контура составляет 2 кВ.

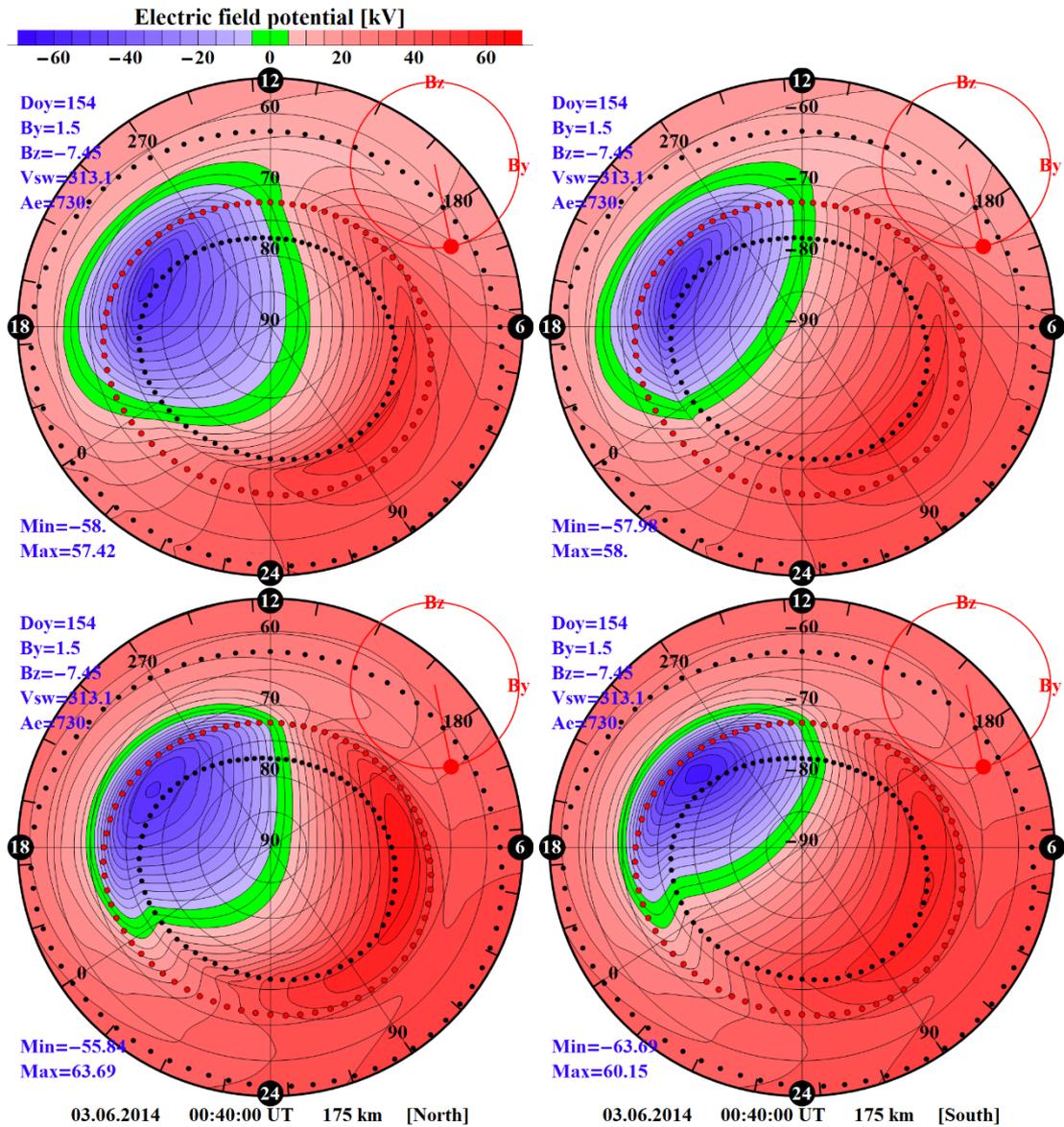


Рис. 3. То же, что и на рисунке 2, но для 00:40:00 UT 03 июня 2014 г. Шаг цветового контура составляет 5 кВ.

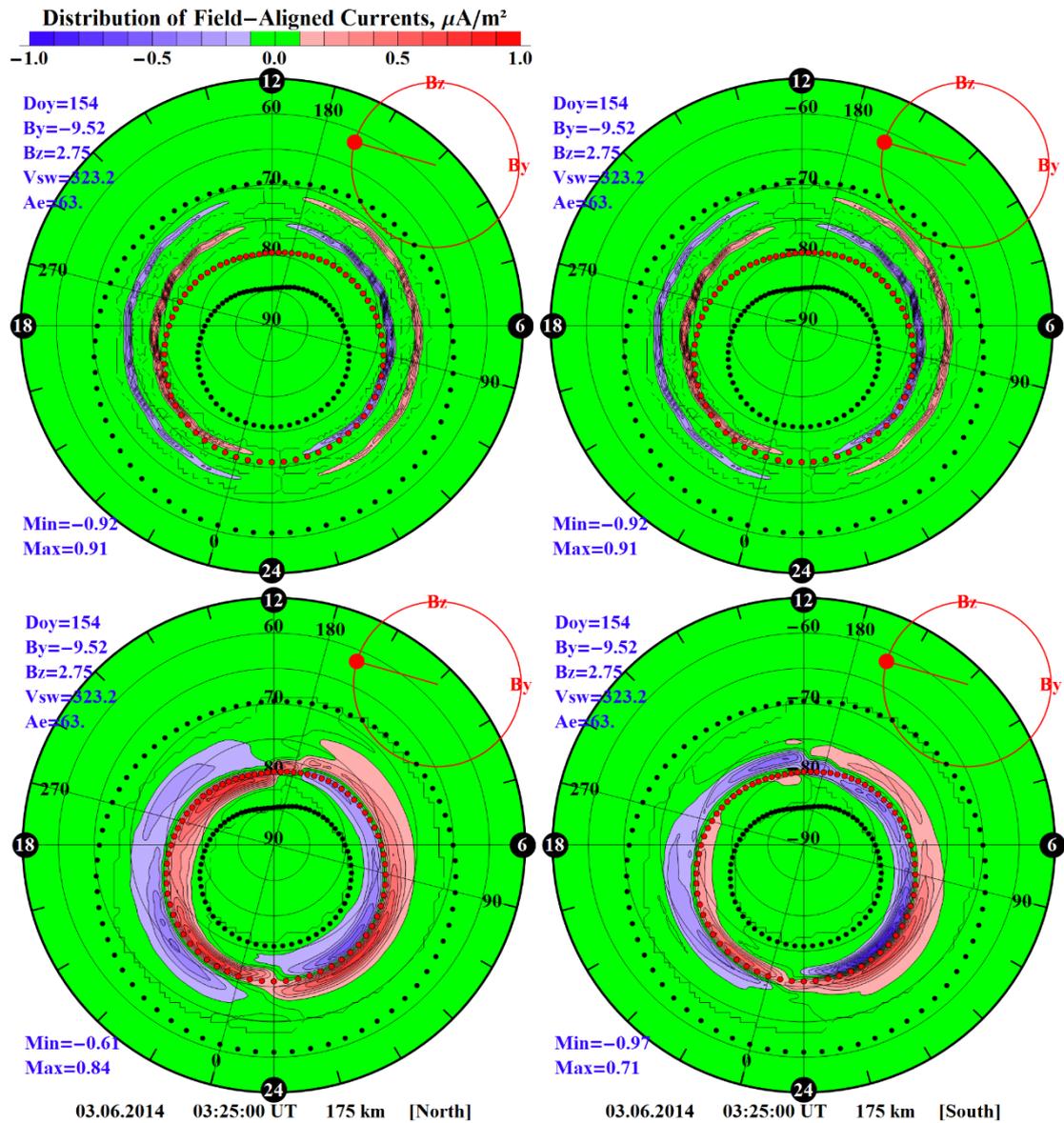


Рис. 4. Карты распределения значений продольных токов для 03:25:00 UT 03 июня 2014 г., рассчитанных с использованием моделей UAM-IP (верхняя панель) и UAM-MFACE (нижняя панель) для Северного (левый столбец) и Южного (правый столбец) полушарий. Все построения выполнены в солнечно-магнитной системе координат. Положение АСС отмечено красными точками. Черными точками обозначены границы продольных токов (как граница в направлении экватора, так и полюса). Границы АСС и продольных токов рассчитываются с помощью модели MFACE. Шаг цветового контура составляет $0,1 \text{ мкА}/\text{м}^2$. Восходящая направленность продольных токов положительна.

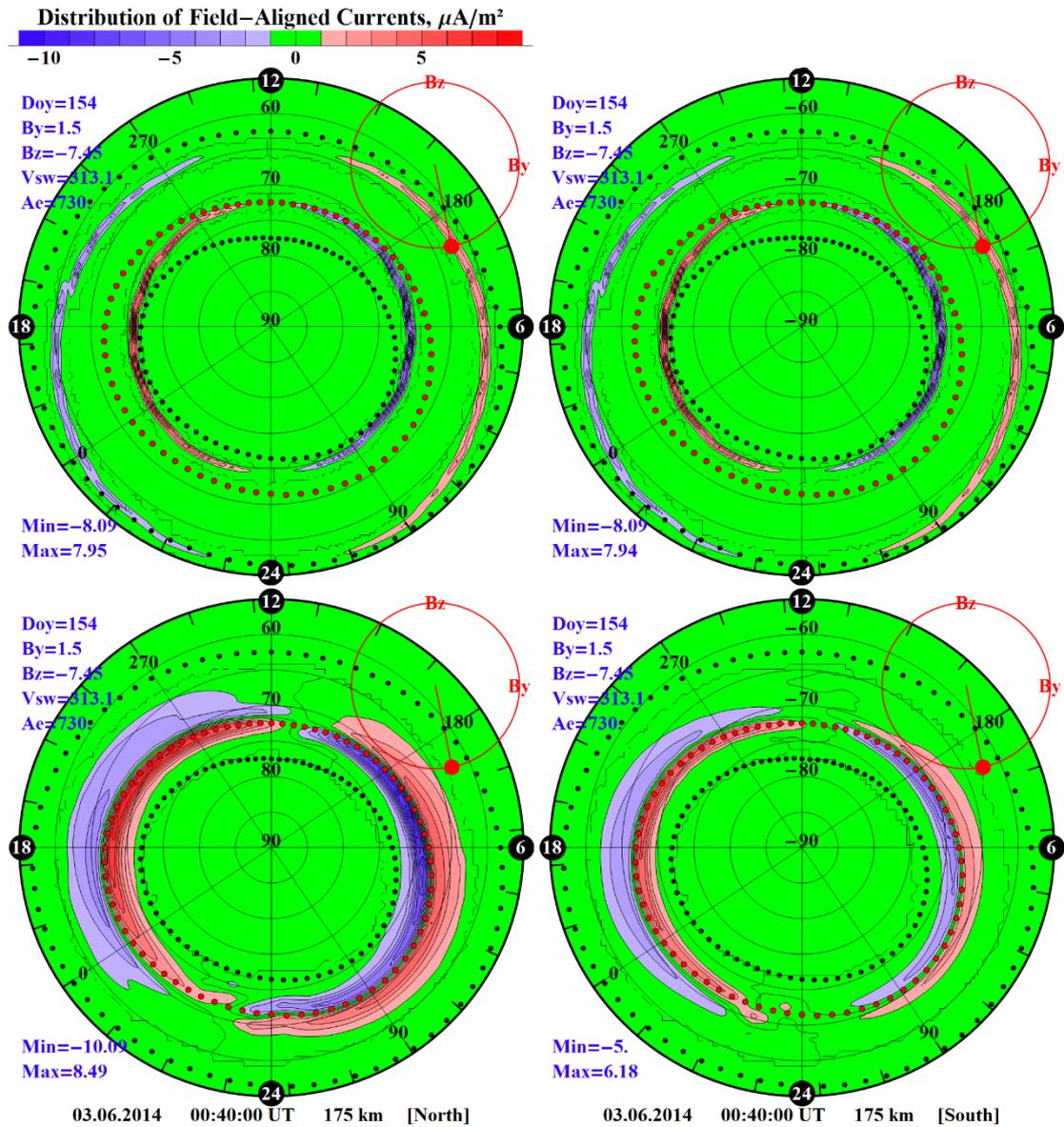


Рис. 5. То же, что и на рисунке 4, но для 00:40:00 UT 03 июня 2014 г. Шаг контура составляет $1,0 \text{ мкА}/\text{м}^2$. Восходящая направленность продольных токов положительна.

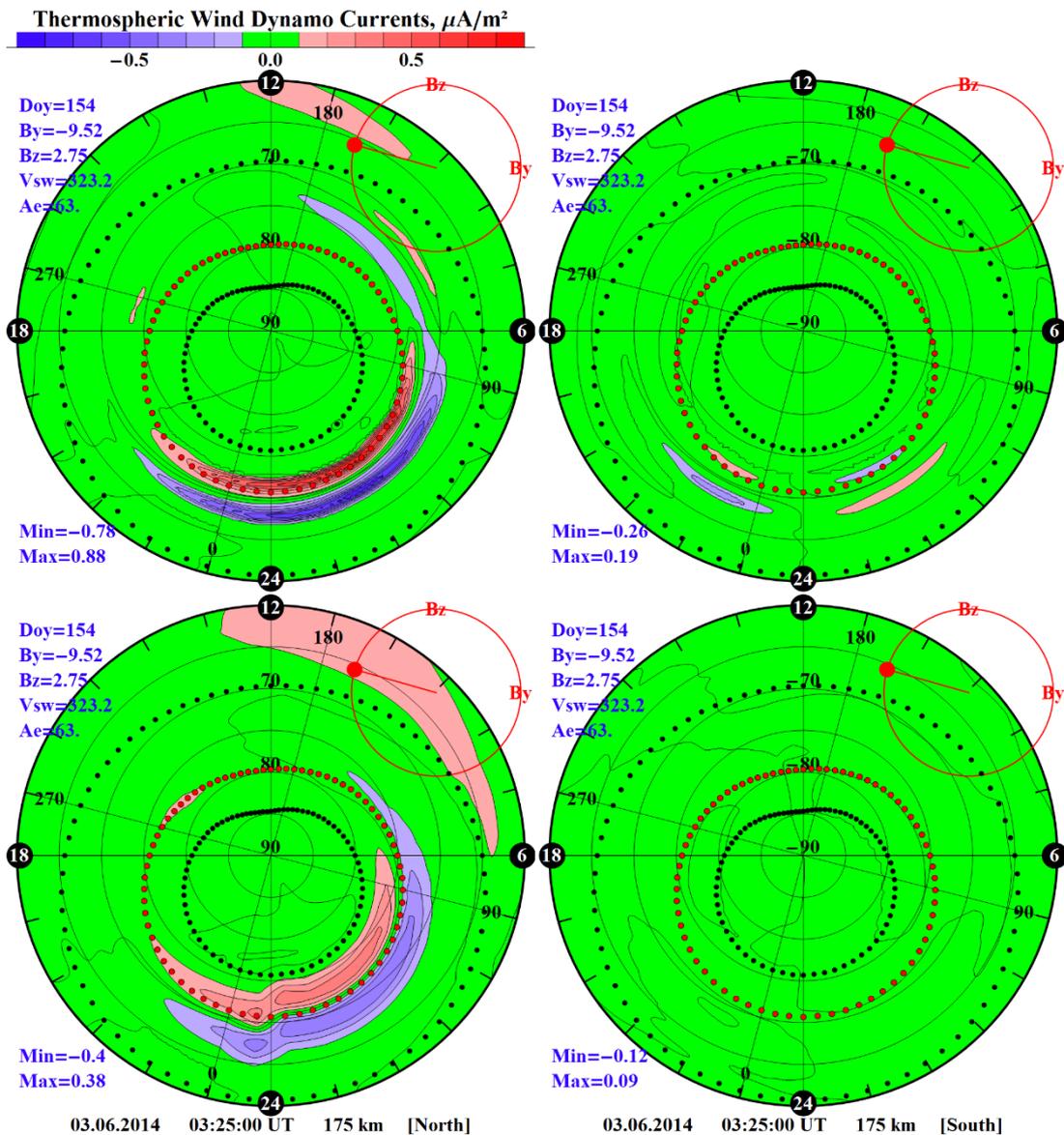


Рис. 6. Карты распределений значений динамо-электрических токов термосферного нейтрального ветра, рассчитанных для 03:25:00 UT 03 июня 2014 г. с использованием моделей UAM-IP (верхняя панель) и UAM-MFACE (нижняя панель) для Северного (левый столбец) и Южного (правый столбец) полушарий. Все построения выполнены в солнечно-магнитной системе координат. Положение АСС отмечено красными точками. Черными точками обозначены границы продольных токов (как граница в направлении экватора, так и полюса). Границы АСС и продольных токов рассчитываются с помощью модели MFACE. Шаг цветового контура составляет $0,1 \text{ мкА}/\text{м}^2$. Восходящая направленность продольных токов положительна.

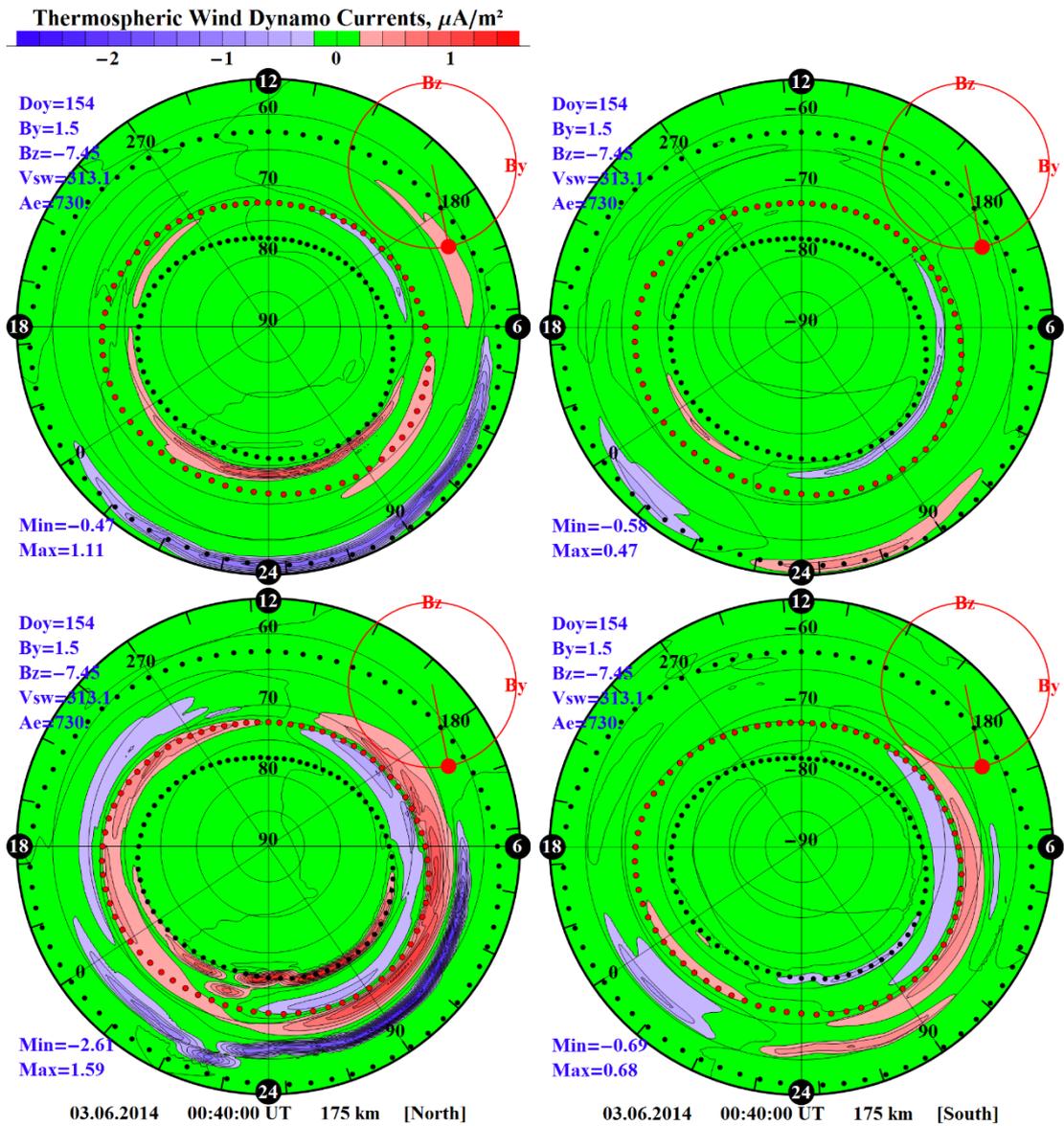


Рис. 7. То же, что и на рисунке 6, но для 00:40:00 UT 03 июня 2014 г. Шаг цветового контура составляет 0,2 мкА/м².

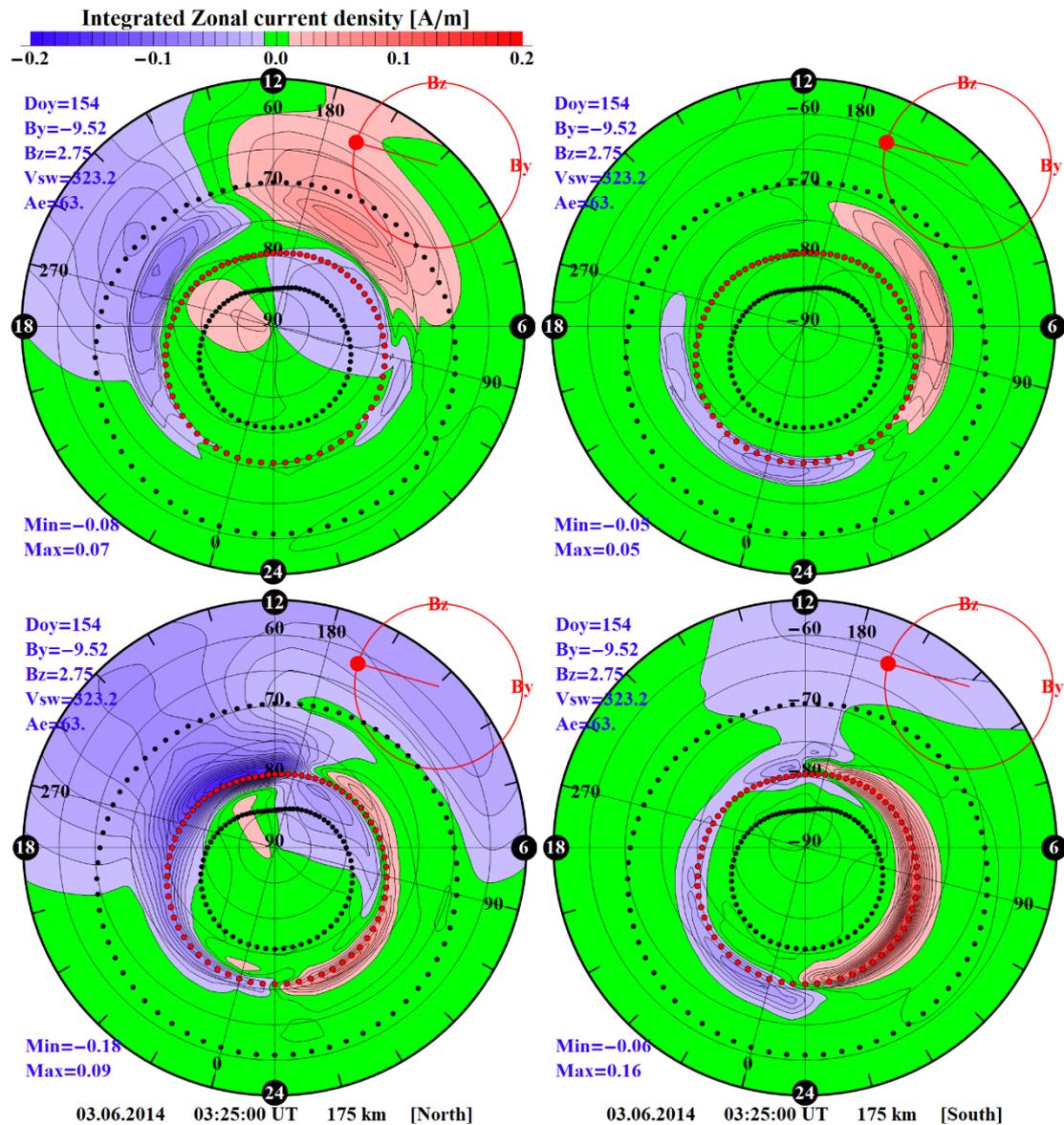


Рис. 8. Карты распределения значений интегрированных зональных компонент электрических токов, рассчитанных для 03:25:00 UT 03 июня 2014 г. с использованием моделей UAM-IP (верхняя панель) и UAM-MFACE (нижняя панель) для Северного (левая колонка) и Южного (правая колонка) полушарий. Все построения выполнены в солнечно-магнитной системе координат. Положение АСС отмечено красными точками. Черными точками обозначены границы продольных токов (как граница в направлении экватора, так и полюса). Границы АСС и продольных токов рассчитываются с помощью модели MFACE. Шаг цветового контура составляет 0,01 А/м. Направление на восток положительное.

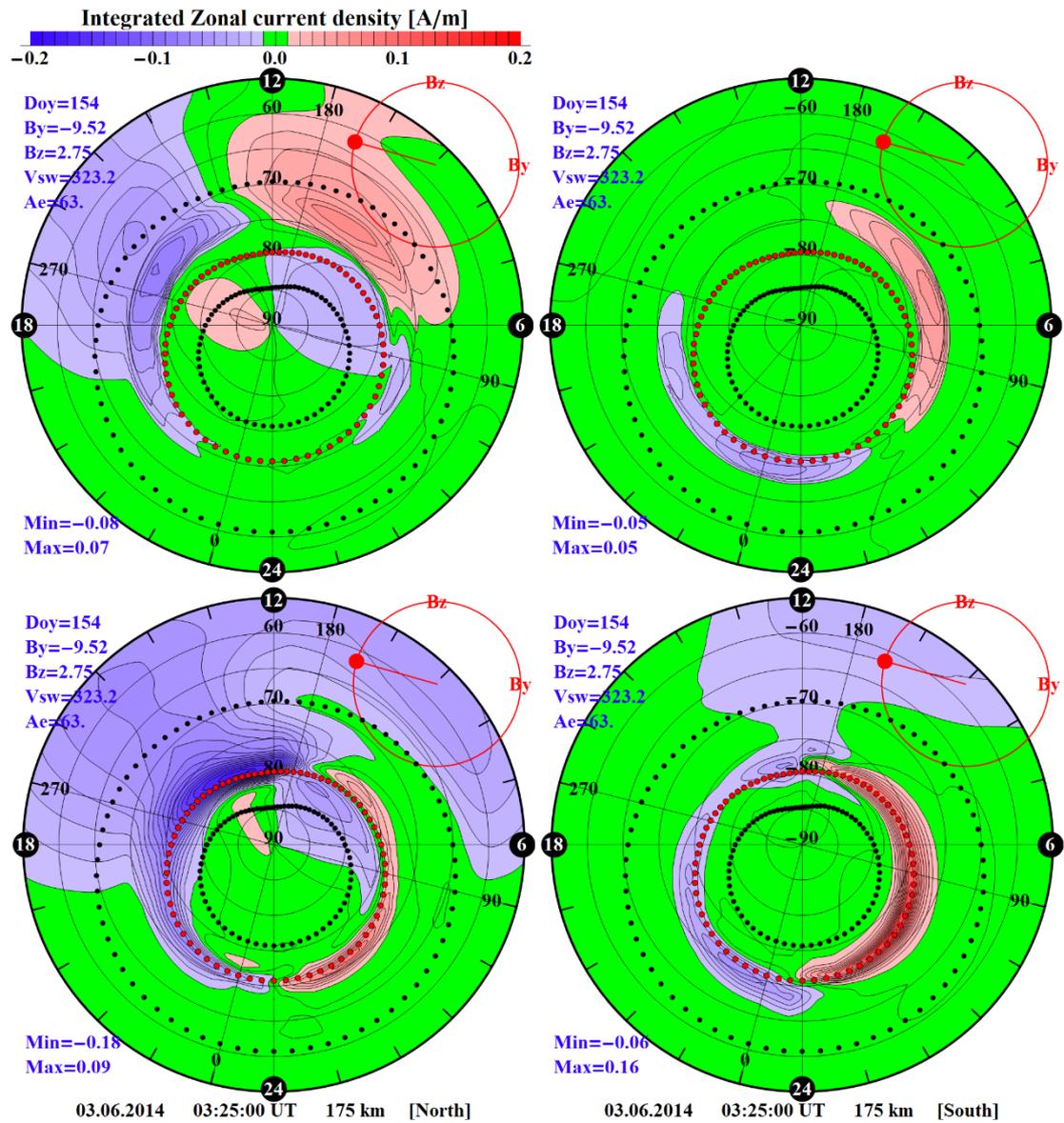


Рис. 9. То же, что и на рисунке 8, но для 00:40:00 UT 03 июня 2014 г. Шаг цветового контура составляет 0,1 A/m.

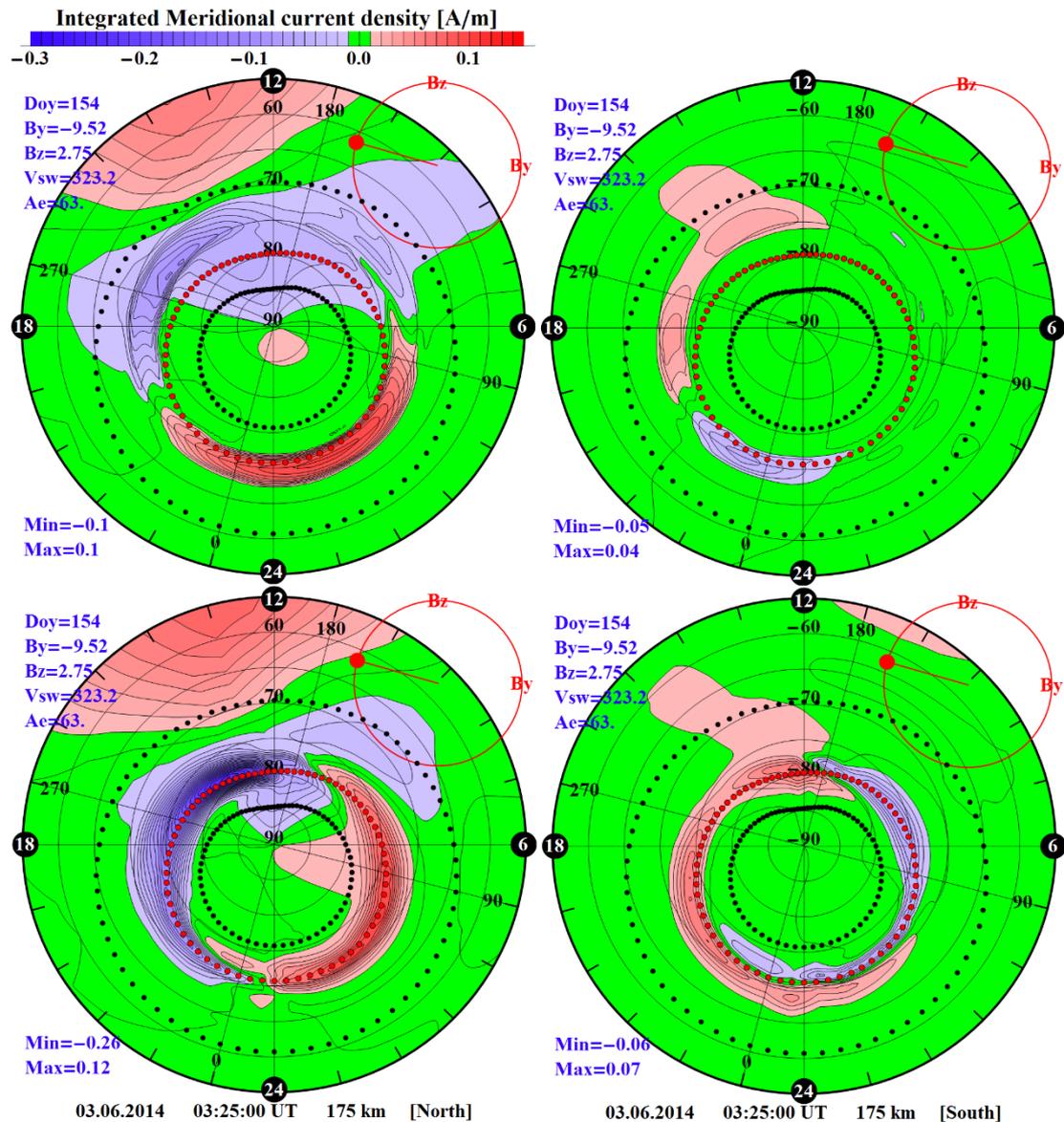


Рис. 10. Карты распределений значений интегрированных меридиональных компонент электрических токов, рассчитанных для 03 июня, 03:25:00 UT, 2014 с использованием моделей UAM-IP (верхняя панель) и UAM-MFACE (нижняя панель) для Северного (левая колонка) и Южного (правая колонка) полушарий. Все построения выполнены в солнечно-магнитной системе координат. Положение АСС отмечено красными точками. Черными точками обозначены границы продольных токов (как граница в направлении экватора, так и полюса). Границы АСС и продольных токов рассчитываются с помощью модели MFACE. Шаг цветового контура составляет 0,01 А/м. Направление на юг положительное.

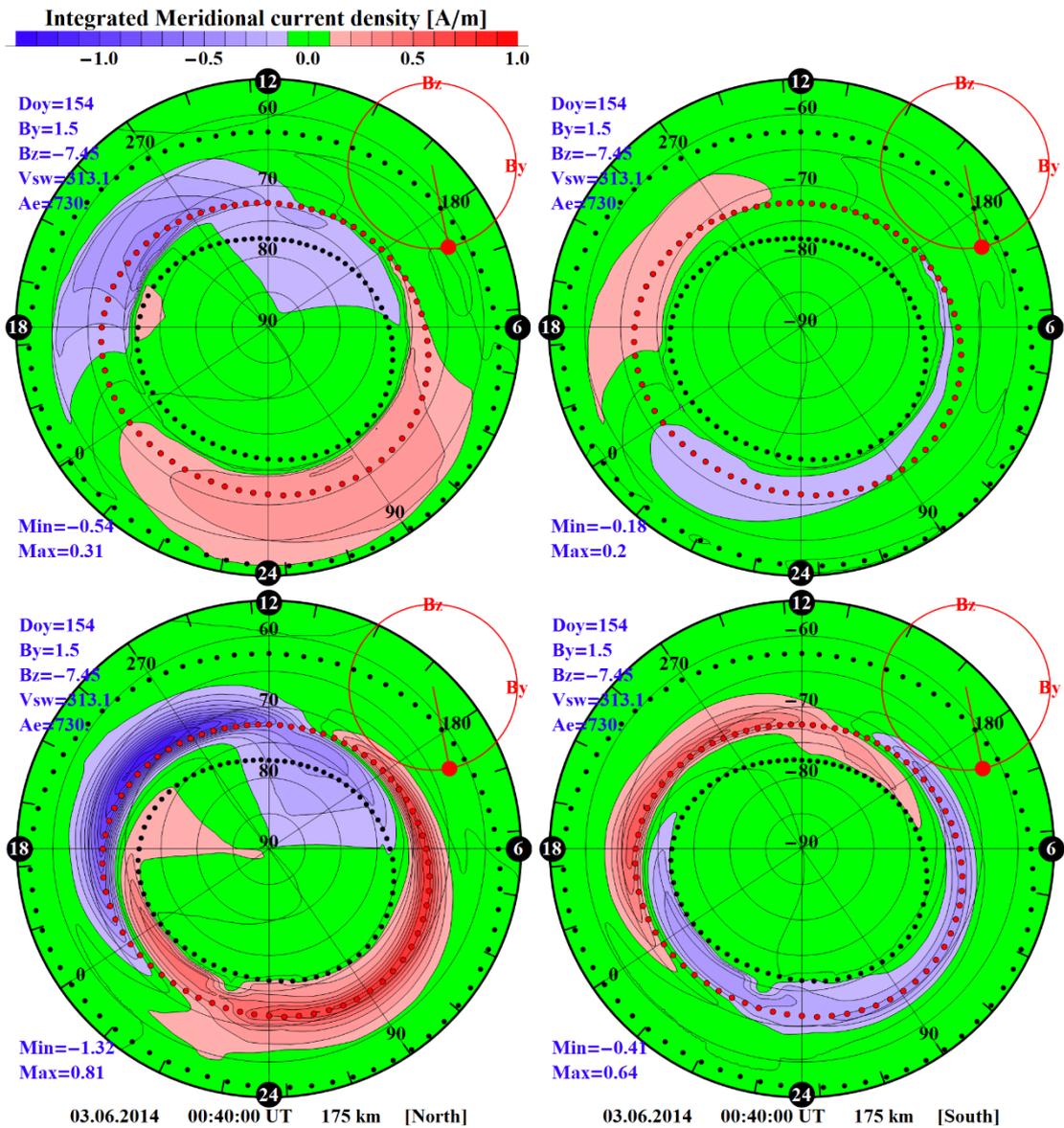


Рис. 11. То же, что и на рисунке 10, но для 00:40:00 UT 03 июня 2014 г. Шаг цветового контура составляет 0,1 А/м

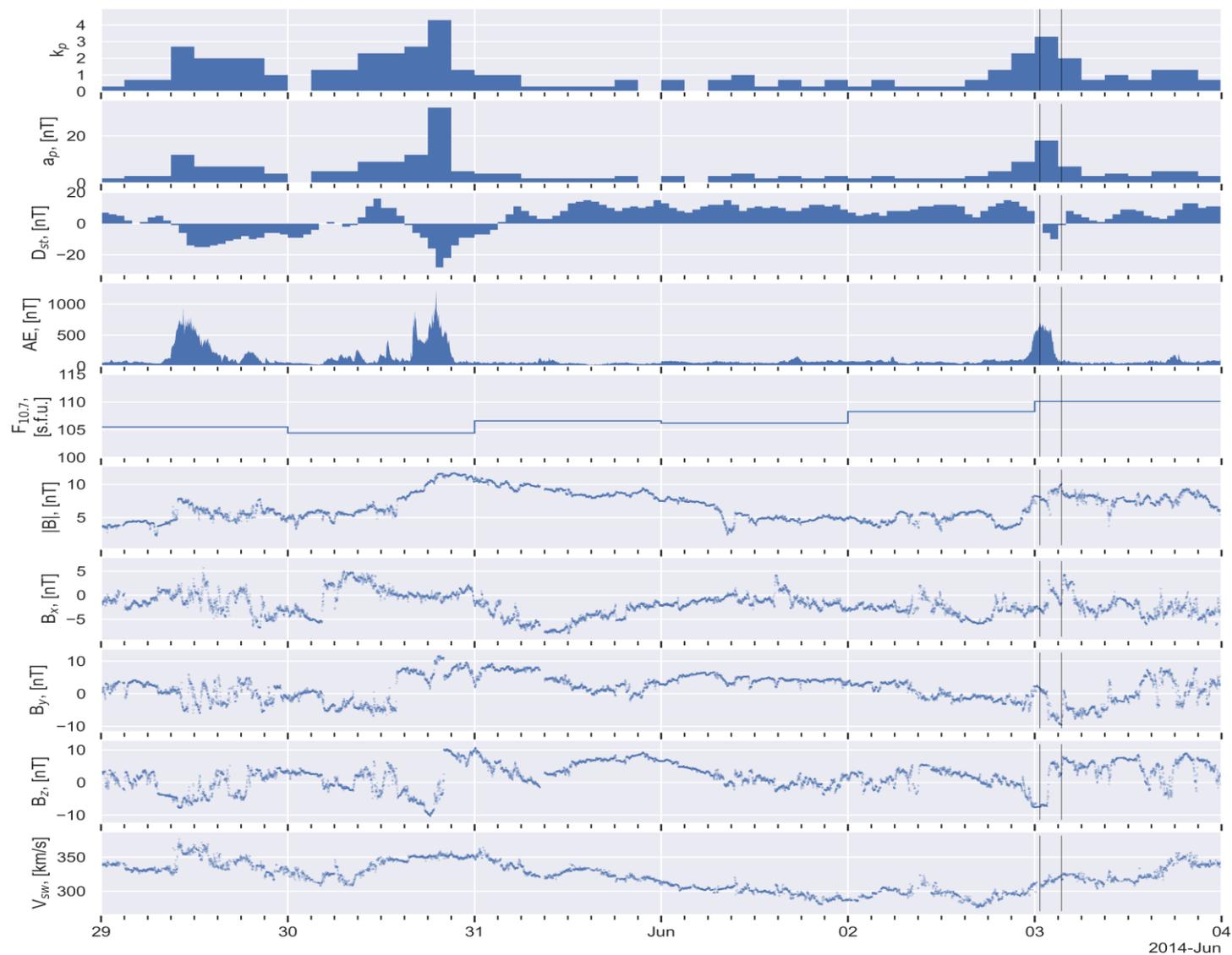


Рис. 12. Временные ряды (сверху вниз) индексов K_p , A_p , Dst , AE , $F_{10.7}$, модуля вектора индукции ММП, компоненты V_x , V_y , V_z ММП и скорость солнечного ветра с 00 UT 29 мая до 24 UT 03 июня 2014 г. Разрешение индексов K_p и A_p составляет 3 часа; Dst индекса – 1 час. Солнечный радиопоток на длине волны 10,7 см (индекс $F_{10.7}$) является суточным индексом. Индекс $F_{10.7}$ измеряется в солнечных единицах потока (с.е.п.), 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹. Значения AE -индекса, модуля вектора индукции ММП, компоненты V_x , V_y , V_z ММП и солнечного ветра имеют разрешение 1 минута. Две вертикальные (левая и правая) сплошные черные линии отмечают моменты 0:40 и 3:25 UT, соответственно. На единой временной шкале внизу (ось x) отмечены начала каждых суток и прорисованы в виде белых линий на подложке графиков; меньшие засечки отмечают 3-часовые временные промежутки.

Заключение

По результату модельного исследования можно сделать следующие выводы:

(a) Для выполнения численного моделирования решается обратная задача. Исходя из заданного распределения электрического поля, ионосферно-магнитосферных источников (магнитосферные токи, ветровое динамо) и тензора проводимости ионосферы рассчитано трехмерное распределение ионосферных электрических токов (вертикальная составляющая и две горизонтальные составляющие, т.е. зональная и меридиональная).

(b) Вариант UAM-IP решает обратную задачу с учетом одномерных магнитосферных токов в качестве входа. В этом варианте продольные токи задаются вдоль контуров зон 1 и 2, а их распределение строго симметрично в Северном и Южном полушариях, т.е. данный вариант не позволяет задавать продольные токи независимо в каждом полушарии.

(c) Версия UAM-MFACE решает обратную задачу с учетом двумерного распределения продольных токов в качестве входных данных. Эта версия позволяет задавать отличающиеся значения продольных токов в Северном и Южном полушариях.

d) Включение зависимости от ММП в UAM расширяет возможности моделирования. UAM-MFACE становится более точной, воспроизводит конфигурацию токов в ионосфере высоких широт лучше, чем версия UAM-IP. Геометрия аврорального овала становится более реалистичной. В то же время этот вариант модели усложняется: требует расширенный список входных параметров, переопределенная пространственной сетки и более мелкие временные шаги моделирования. Независимые расчеты и калибровки для Северного и Южного полярных районов требуют значительного увеличения машинного времени счёта. В результате версия UAM-MFACE работает медленнее, чем UAM-IP.

Дополнительная информация

Результаты работы опубликованы в E3S Web Conf., Volume 583, 2024, Innovative Technologies for Environmental Science and Energetics (ITESE-2024), Article Number 07009, Number of page(s) 18, Section «Smart Electricity Grids, Electricity and Magnetism», DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458307009>

Работа выполнена в рамках независимого научно-исследовательского проекта No 124041100069-6 в Мурманском арктическом университете, Мурманск, Россия. В работе использованы геофизические данные, публикуемые Центром космических полетов им. Годдарда, США. Авторы выражают благодарность исследователям, чьи наработки были использованы для выполнения представленных расчетов.

Адрес электронной почты: borisprokhorov@yandex.ru