КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2023, том 61, № 6, с. 466–475

УДК 533.951+537.86+537.876

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ НА ЭЛЕКТРОННУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ В ИОНОСФЕРЕ: СОПРЯЖЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ *SWARM* И РАДАРА ESR

© 2023 г. Р. Ю. Лукьянова*

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**renata@aari.ru*

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.
После доработки 22.03.2023 г.
Принята к публикации 24.03.2023 г.

Представлены результаты сопряженных измерений КА *SWARM* и европейского радара некогерентного рассеяния на Шпицбергене для двух событий одновременных наблюдений: в ночной ионосфере во время активации суббури 9.I.2014 и в дневной ионосфере в спокойных условиях 5.II.2017. Бортовые магнитометры КА *SWARM* обеспечивают измерения плотности продольных токов над ионосферой. Радар, находящийся в это время под траекторией пролета, измеряет вертикальное распределение электронной концентрации Ne. Эксперименты показали, что в ночных возмущенных условиях в месте вытекающего из ионосферы продольного тока плотность плазмы увеличивается по всей толще ионосферы, и изменение Ne находится в согласии с теоретическими оценками. В дневной спокойной ионосфере Ne увеличивается только в *F*-слое, но практически не изменяется в слое *E*. Различия могут быть обусловлены тем, что в первом случае носители направленного вверх тока представлены всем энергетическим спектром авроральных электронов 1–10 кэВ, а во втором – только низкоэнергичной частью.

DOI: 10.31857/S0023420623600083, **EDN:** BZJNFS

ВВЕДЕНИЕ

Продольный электрический ток (ПТ), который протекает вдоль силовых линий геомагнитного поля **B**, играет основную роль в передаче энергии между солнечным ветром, магнитосферой и ионосферой. Спутниковые наблюдения выявили глобальное распределение ПТ в ионосфере, а также позволили определить механизмы генерации ПТ в магнитосфере. Крупномасштабная система ПТ включает токи зоны 1, которые связывают внешние слои магнитосферы с высокоширотной ионосферой, и расположенные экваториальнее токи зоны 2, которые соединяют внутреннюю магнитосферу с авроральной ионосферой [1]. Плотность крупномасштабных ПТ обычно составляет порядка 1 $\mu А/м^2$. Однако токовые слои неоднородны, в них встроены токи малых пространственных масштабов, но большой интенсивности, порядка 10–100 $\mu А/м^2$ [2, 3].

Носителями ПТ являются электроны, обладающие малой массой и большой подвижностью вдоль **B**. Направленные вверх (вытекающие из ионосферы) ПТ соответствуют нисходящему электронному тепловому потоку, тогда как втекающие в ионосферу ПТ сопровождаются уходящим электронами. В области вытекающих ПТ происходит увеличение электронной плотности и соответствующее повышение проводимости. В области втекающего ПТ имеет место уменьшение числа электронов. Для замыкания ионосферного тока, соединяющего области с разными проводимостями, в месте втекающего ПТ электрическое поле должно быть больше, чем в месте вытекающего. Это явление считается одной из общих черт дуг полярных сияний, оно наблюдалось с помощью сочетания оптических методов с радарными и спутниковыми измерениями (напр., [4, 5]). В ионосфере ПТ замыкаются за счет токов Педерсена, носителями которых являются в основном ионы. Таким образом, возникает трехмерная токовая система, а в области втекания и вытекания ПТ в ионосферной плазме должно происходить локальное изменение плотности плазмы.

Теоретические оценки изменений электронной концентрации (Ne) были сделаны на основе решения уравнений для движения ионосферной плазмы и замыкания токов [6–8]. Однако, за годы, прошедшие со времени появления этих работ, так и не появилось экспериментальных подтверждений данного эффекта. Это связано с тем, что в эксперименте необходимо иметь данные одновременных измерений плотности ПТ и верти-

кального профиля Ne. Прямые измерения ПТ над ионосферой могут быть проведены только с помощью низкоорбитальных космических аппаратов (КА), а распределение Ne по высоте может быть получено только с помощью радара некогерентного рассеяния, находящегося в это время под траекторией пролета. Поскольку фактически есть только два высокоширотных некогерентных радара – на архипелаге Шпицберген и на Аляске, а на полярной орбите в настоящее время находится только КА *SWARM*, и эти две измерительные структуры не проводят скоординированных экспериментов, обеспечить нужное сочетание наблюдений весьма сложно. Тем не менее, используя открытую базу данных измерений европейского радара ESR и КА *SWARM*, удалось отобрать несколько репрезентативных событий. Цель данной работы – изучить влияние ПТ на профиль электронной концентрации с помощью сопряженных наблюдений КА *SWARM* и радара EISCAT ESR (*англ.* European Incoherent Scatter Scientific Association – EISCAT Svalbard Radar) во время избранных репрезентативных событий.

1. СПУТНИКИ *SWARM* И РАДАР НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ESR

Группировка *SWARM*, состоящая из трех идентичных КА, находится на низкой полярной орбите с 2014 г. Два КА, *SW-A* и *SW-C*, летят на высоте 420 км параллельно друг другу на расстоянии 0.5°...1.5° по долготе; наклонение орбиты 87.4°. Орбита третьего КА, *SW-B*, лежит в другой меридиональной плоскости (наклонение 88°) на высоте 500 км. Постепенно смещаясь, за 7...10 мес. траектории спутников покрывают все долготные сектора земного шара. Все три КА *SWARM* оснащены идентичной аппаратурой. Основным модулем является комплекс для магнитных измерений: высокочувствительный векторный и скалярный магнетометры для определения величины и направления полного вектора и вариаций геомагнитного поля с точностью до 0.1 нТл и частотой 1 Гц. В высоких широтах вертикально направленный ток создает магнитное поле, вектор которого лежит в горизонтальной плоскости. Если траектория КА пересекает ПТ, бортовой магнитометр кроме главного поля измеряет магнитные вариации, по величине которых вычисляется плотность тока. Рассчитанная по стандартному алгоритму [9] плотность ПТ является одним из параметров, входящих в базу данных *SWARM*. Помимо магнитометрической аппаратуры КА оснащены ленгмюровскими зондами для измерения плотности и температуры электронной компоненты ионосферной плазмы. Данные *SWARM*, структуированные по суточным файлам, представлены на сайте Европейского космического агентства.

Радары европейской научной системы EISCAT предназначены для исследования ионосферы путем излучения радиосигнала на 500 МГц и получения сигнала обратного рассеяния, по которому можно сделать вывод о физических параметрах ионосферы, таких как характеристики Ne, температура электронов и ионов, скорость ионов на луче зрения в диапазоне от 90 до 400 км. Самый северный из радаров – ESR (Европейский некогерентный радар) расположен на архипелаге Шпицберген (78.2° с.ш., 16° в.д.). Он измеряет характеристики ионосферной плазмы вблизи границы полярной шапки. Система состоит из двух антенн: одна диаметром 42 м неподвижна и направлена вдоль местной линии геомагнитного поля (азимут 184°, угол наклонения 82.1°), вторая, диаметром 32 м, полностью управляемая. Периодически большая антенна выполняет измерения по общей программе CP (режим ipy). В этом режиме получаются ряды высотных профилей ионосферных параметров при зондировании вдоль силовой линии геомагнитного поля. Для оценки плотности и температуры электронов, температуры и скорости ионов в пределах прямой видимости луча с разрешением 1 мин на высотах 100–400 км с разделением на 32 диапазона используется стандартное программное обеспечение GUISDAP [10]. Онлайн база данных MADRIGAL содержит данные наблюдений во время сеансов работы ESR с 1996 г.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДАРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для поиска событий сопряженных спутниковых измерений ПТ и радарных измерений вертикального профиля Ne из базы данных *SWARM* были отобраны траектории пролетов, проходящие над локацией ESR на расстоянии не более, чем 2° по широте (~60 км). Затем для этих событий были проверена база данных ESR на предмет проведения в это время сеансов 42-метровой антенны. В данном разделе рассмотрены два репрезентативных события сопряженных измерений, одно из которых (5.II.2017) происходило в магнитоспокойный период, а второе (9.I.2014) – во время активации суббури. На рис. 1 для этих двух дней показаны значения локального индекса авроралного электроджета, IE, который вычисляется по данным скандинавской меридиональной цепочки магнитометров IMAGE.

2.1. Событие 5.II.2017

В этот день траектории пролета тандема КА *SW-A* и *SW-C* проходили вблизи локации ESR в 15.20–15.30 мирового времени (UT). *SW-C* опережал *SW-A* на 4 с и находился примерно на один градус долготы ближе к лучу радара. На рис. 2 по-

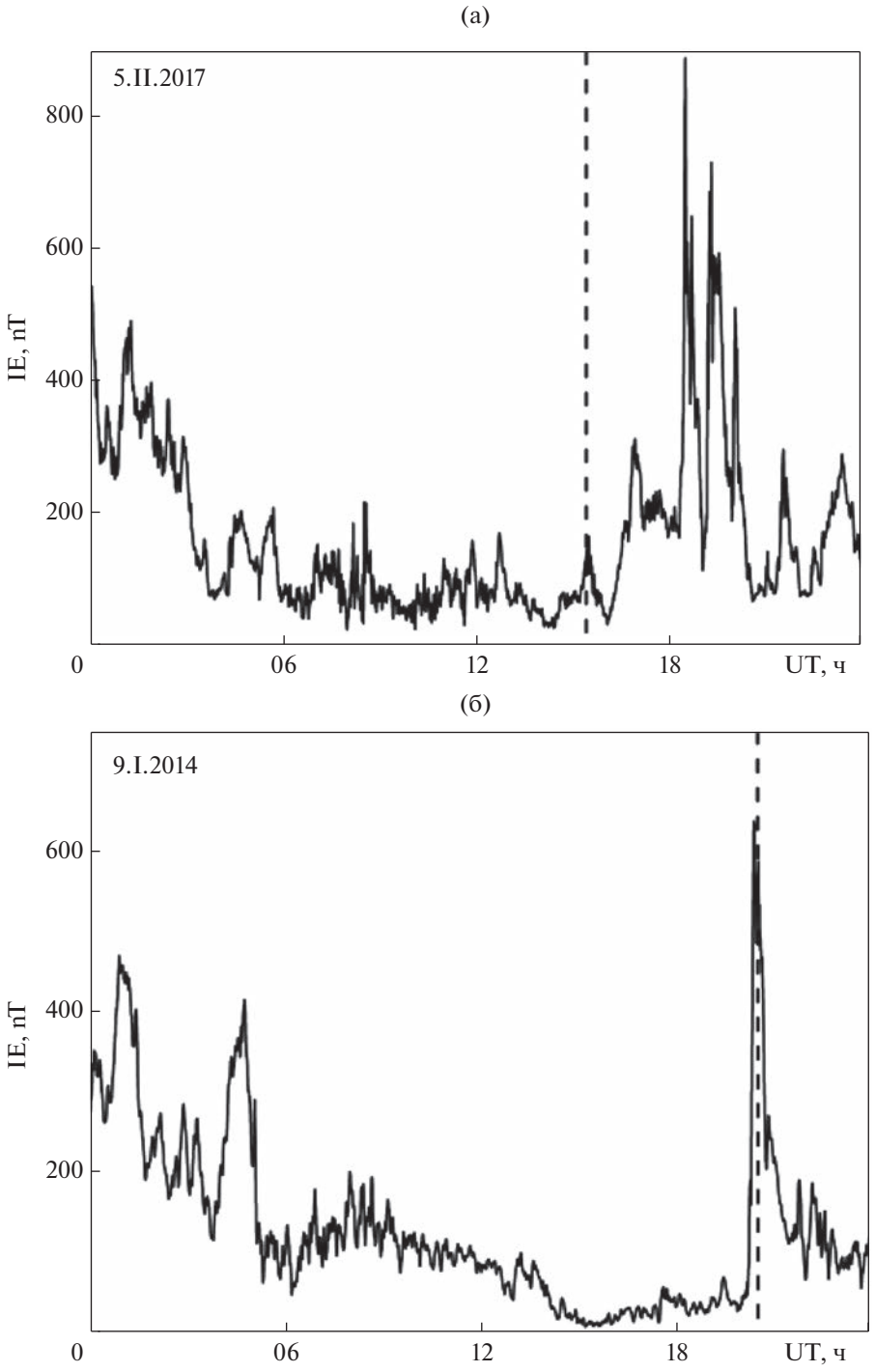

Рис. 1. IE индекс 5.II.2017 и 9.I.2014. Вертикальными пунктирными линиями показаны моменты нахождения КА *SWARM* над радаром ESR.

казана часть траектории пролета тандема КА в прямоугольнике, ограниченном географическими координатами 65°–85° с.ш. и 5°–27° в.д. (рис. 2а), а также полярная проекция траектории в геомагнитных координатах (рис. 2б). Полярная проекция наложена на картину крупномасштабных ПТ, полученную по данным *AMPERE* (*англ.* Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment). В рамках проекта AMPERE через веб портал доступны карты распределения плотности ПТ в высокоширотной области с 10-минутным разрешением. Карты построены по измерениям вариаций магнитного поля инженерными магнитометрами спутниковой группировки *Iridium*

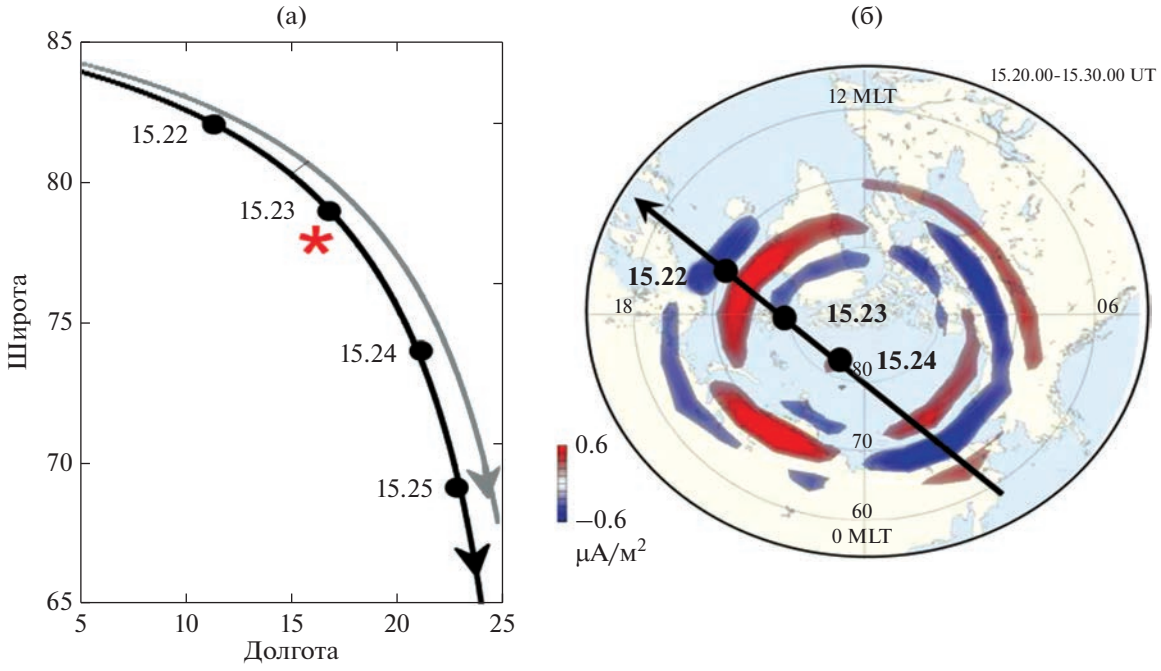

Рис. 2. (а) Траектории пролета КА *SW-A* (серая линия) и *SW-C* (черная линия) в 15.22–15.25 UT 5.II.2017; географические координаты; звездочкой обозначена локация радара ESR; (б) Ионосферная проекция ПТ по данным *AMPERE* (красный цвет – вытекающий из ионосферы ток, синий цвет – втекающий в ионосферу ток), усредненная за интервал 15.20–15.30 UT, и траектория пролета КА (черная линия и минутные реперные точки); координаты местное геомагнитное время (MLT)–геомагнитная долгота.

Communication, состоящей из более чем 70 КА на околополярной орбите [11]. На рис. 2б можно видеть, что к югу от Шпицбергена расположен крупномасштабный вытекающий ПТ с плотностью до 0.6 μA/м^2. КА *SW-A* и *SW-C* пролетают вблизи луча ESR примерно в середине минуты 15.23 UT, а зону вытекающего ПТ попадают в конце этой минуты.

Параметры продольного электрического тока, рассчитанные по измерениям бортовых магнитометров КА *SW-A* и *SW-C*, представлены на рис. 3. Для выявления крупномасштабных структур исходные одногерцовые значения усреднены по 31 точке. Наблюдение обоих спутников указывает на то, что крупномасштабный втекающий (считающийся положительным) ПТ с плотностью до 0.8 μA/м^2. расположен примерно между 66° и 70° широты, а вытекающий (считается отрицательным) немного меньшей плотности – между 73° и 79°. Мгновенные (1 с) значения ПТ достигали 4 μA/м^2. Ближайший к радару отрезок траектории КА находится в зоне вытекающего из ионосферы тока.

В этот день радарные наблюдения проводились по программе CP в режиме ipy с 13.00 до 18.00 UT. На рис. 4а представлены одноминутные вертикальные профили Ne, измеренные в период с 15.21 по 15.28 UT. Можно видеть, что в 15.23 на высотах *F*-слоя, 250–300 км, наблюдается резкое увеличение Ne до $1.4 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$. Небольшое увеличение плотности заметно и ниже, в диапазоне 170–220 км. Момент времени соответствует как раз пересечению спутниками зоны ПТ, вытекающего из ионосферы. Для количественной оценки изменения Ne на рис. 4б выделены три профиля: центральный в 15.23 UT и усредненные за три предыдущие и три последующие минуты. Разность между центральным и соседними, предыдущим и последующим, профилями в максимуме Ne на высоте 260 км составляет, соответственно, $2.5 \cdot 10^{10}$ и $7 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$. Различия заметны и на больших, и на меньших высотах. В слое *E* они равны нескольким десятым долям единицы.

Следует отметить, что усреднение радиолокационных и спутниковых данных вносит некоторую неопределенность в результат их сравнения. На высоте *F*-слоя диаметр объема, наблюдаемого радаром, составляет около 2 км, наклон луча смещает область засветки примерно на 50 км к югу от локации антенны. В зональном направлении радар поворачивается вместе с Землей со скоростью примерно 15 км/мин, и постепенно луч может выходить из области, занятой ПТ. Время интегрирования радиолокационных данных, необходимых для получения приемлемого отношения сигнал/шум – 1 мин. Длина проекции 1-минутного отрезка траектории спутника, летящего вдоль меридиана – порядка 200 км. Очевидно, что усредненные по пространству и времени данные

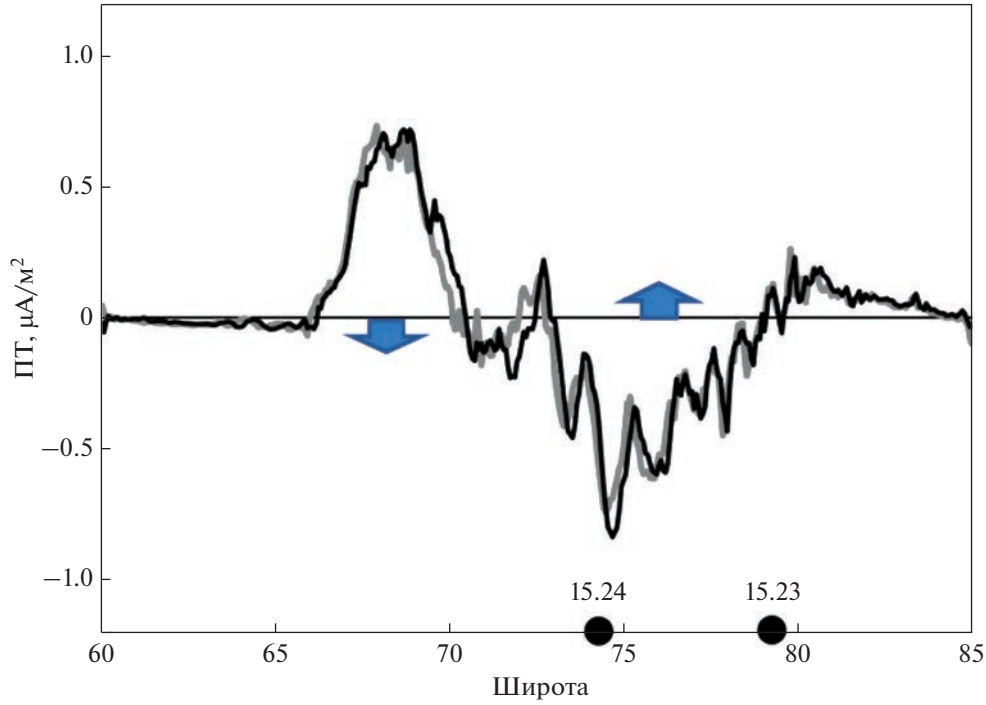

Рис. 3. Плотность ПТ по измерениям КА *SW-A* (серая линия) и *SW-C* (черная линия) 5.II.2017. Стрелкой, направленной вниз (вверх), обозначен ПТ, втекающий в ионосферу (вытекающий из ионосферы). На оси *X* точками обозначены минуты, когда КА *SW-C* находился вблизи ESR.

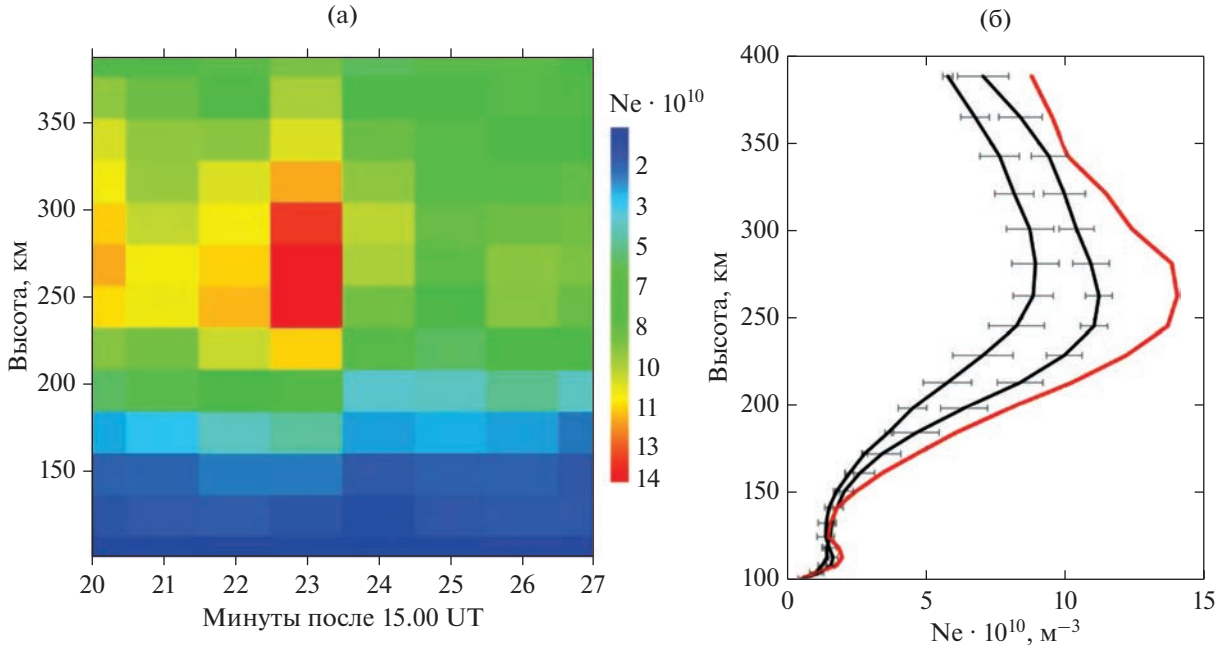

Рис. 4. (а) Высотное распределение Ne в 15.20–15.27 UT 5.II.2017; (б) Вертикальный профиль Ne в 15.23 UT (красная линия) и профили, усредненные за три предыдущие и три последующие минуты (линии со стандартным отклонением).

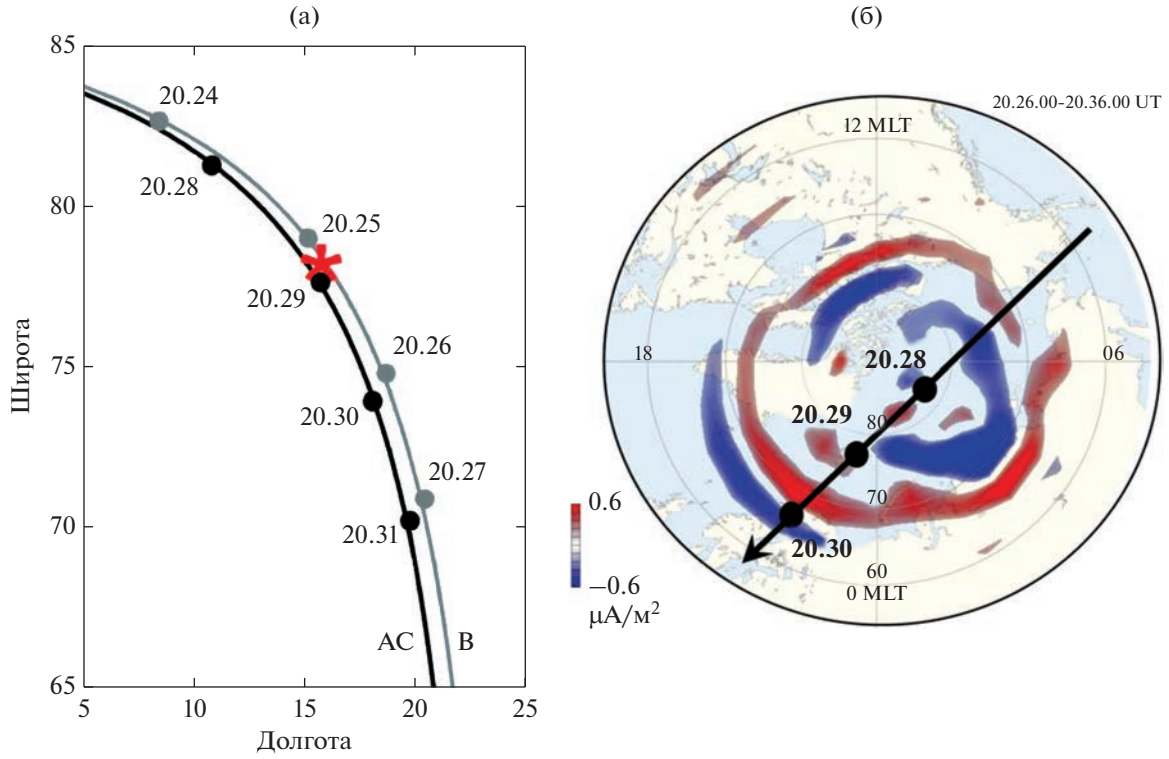

Рис. 5. (а) Траектории пролета и минутные реперные точки КА *SW-A* и *SW-C* (общая черная линия) и *SW-B* (серая линия) 9.I.2014 в географических координатах; звездочкой обозначена локация радара ESR; (б) Ионосферная проекция ПТ по *AMPERE* (красный цвет – ПТ, вытекающий из ионосферы, синий цвет – ПТ, втекающий в ионосферу), усреднение за 20.26–20.36 UT и траектория пролета КА (черная линия); координаты MLT-геомагнитная долгота.

радарных измерений не обязательно соответствуют какой-либо из мелкомасштабных форм ПТ, наблюдаемых со спутника. Однако, если ПТ сохраняет свое основное направление (ток втекающий или вытекающий) в течение минуты, по которой усредняется Ne, то сравнение можно считать достаточно корректным.

2.2. Событие 9.I.2014

В этот день пролет спутников над радаром, работающим в режиме CP, совпал с пиком активации суббури, а траектория проходила через предполуночный сектор местного времени. В 20.29 UT В возмущенных условиях структура ПТ, особенно мелкомасштабная, нестабильна и может меняться быстро. На рис. 5 показана часть траектории пролета КА *SWARM* вблизи луча ESR (рис. 5а) и полярная проекция крупномасштабных ПТ по *AMPERE* (рис. 5б). В начальный период миссии *SWARM* до начала процедуры сепарации орбит в конце зимы 2014 г. все три КА летели вблизи друг друга. Поэтому графически траектории *SW-A* и *SW-C* совмещаются в одну линию. Траектория *SW-B* проходит немного восточнее, и этот КА опережает тандем на несколько секунд. Усредненная картина ПТ на рис. 5б показывает, что в точке траектории в 20.29 UT ESR находится в области расслоившегося крупномасштабного вытекающего ПТ. В 20.30 UT КА пересекают зону вытекающего тока. Когда Земля вращается, и развивается суббуря, положение радара может смещаться туда и обратно между зонами 1 и 2 с ПТ противоположного направления. Пролетая через ночную часть авроральной зоны, спутники наблюдают множество мелкомасштабных структур, встроенных в крупномасштабные ПТ.

На рис. 6 представлены усредненные по 31 точке плотности токов по данным *SW-C* и *SW-B*. Наблюдаются три слоя крупномасштабных ПТ: втекающий ток с плотностью до 2 μA/м^2 расположен примерно между 77° и 79° широты, вытекающий ток сравнимой плотности — между 71° и 77°. Ближайшая к траектории позиция радара находится в зоне вытекающего из ионосферы тока. Исходные секундные значения ПТ (не показаны) достигали 10 и более μA/м^2. Такие величины могут регистрироваться КА *SWARM* над дугами и лучами полярных сияний во время суббурь [12].

В день 9.I.2014 радарные наблюдения проводились по программе CP в режиме ipy в течение всего дня. На рис. 7а представлены последовательные 1-минутные вертикальные профили Ne, измеренные в период с 20.21 по 20.38 UT. В 20.29 UT во

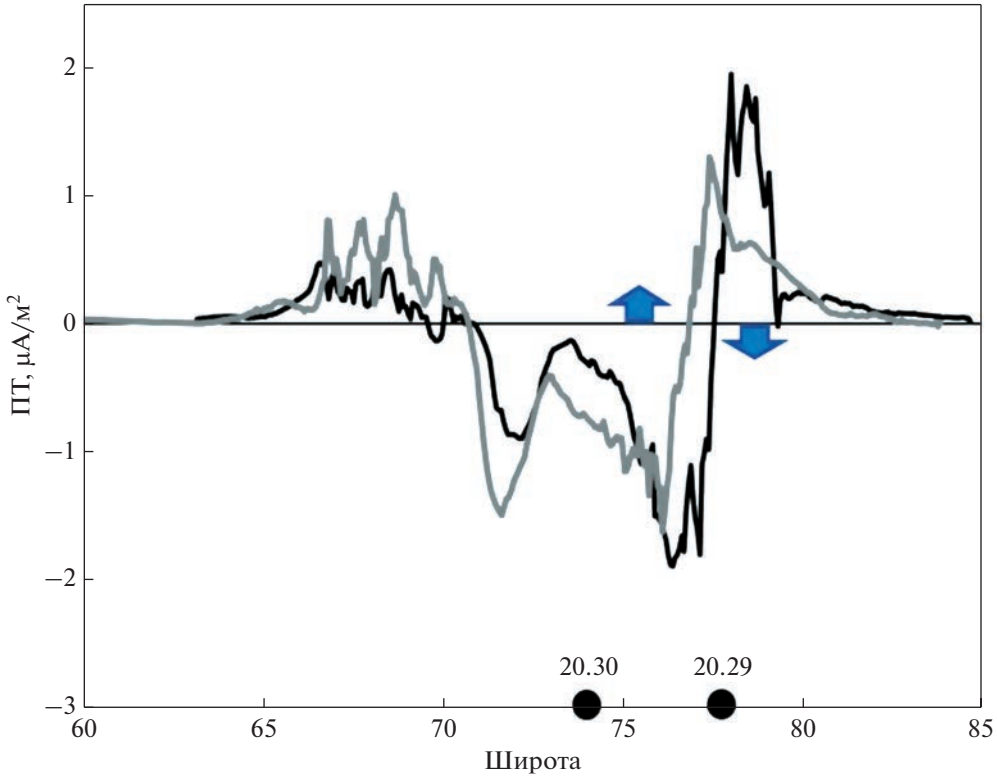

Рис. 6. Плотность ПТ по измерениям КА *SW-A* (серая линия) и *SW-C* (черная линия) 9.I.2014. Стрелкой, направленной вниз (вверх), обозначен ПТ, втекающий в ионосферу (вытекающий из ионосферы). На оси *X* точками обозначены минуты, когда КА *SW-C* находился вблизи ESR.

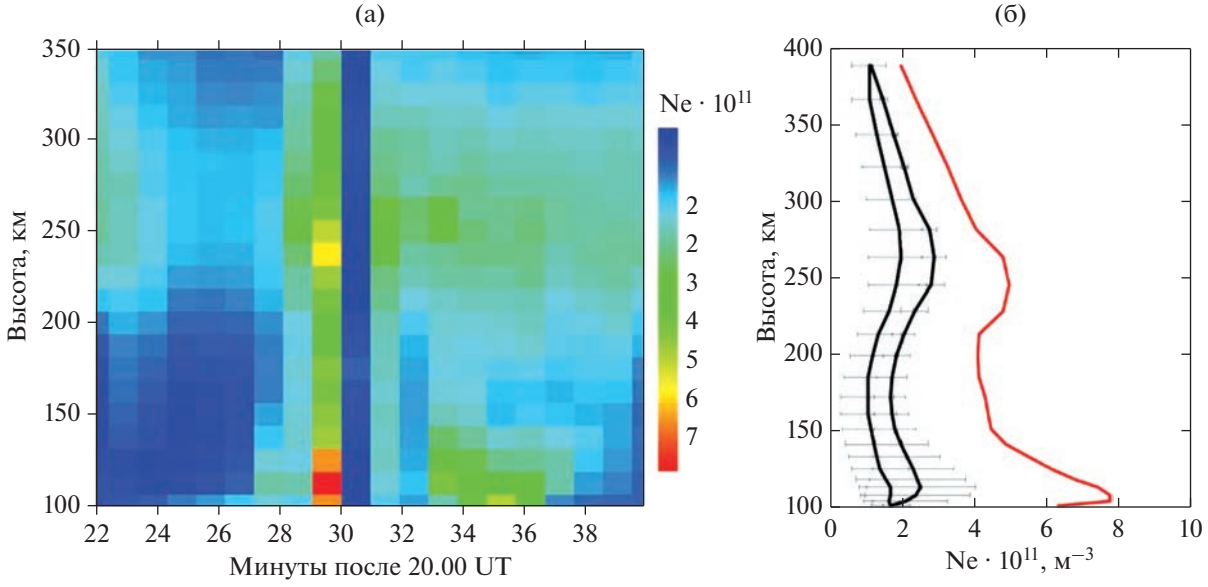

Рис. 7. (а) Высотное распределение Ne в 20.21–0.38 UT 9.I.2014; (б) Вертикальный профиль Ne в 20.29 UT (красная линия) и профили, усредненные за три предыдущие и три последующие минуты (линии со стандартным отклонением).

время активизации суббури при пересечении траекторией спутников слоя вытекающего из ионосферы ПТ максимальное увеличение Ne, до $8 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$, наблюдалось на высотах 120 км в *E*-слое. Увеличение плотности плазмы до $5 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$ заметно и в *F*-слое, причем по всей его высоте. Аналогично предыдущему событию на рис. 7б показаны три профиля: центральный в 20.29 UT и профили, усредненные за три предыдущие и три последующие минуты (минута 20.30 UT пропущена как сбой-

Таблица 1. Значения параметров во время событий 5.II.2017 и 9.I.2014

	5.II.2017		9.I.2014	
Геомагнитные условия	спокойные		суббуря	
MLT пролета КА над радарным лучом	~16.30		~21.30	
Измеренная плотность восходящего ПТ (μA/м^2)	MAX значение при 30-с усреднении (1-секунный экстремум)			
	0.8 (7.5)		1.8 (12.2)	
Тип оценки	Теория	Измерения	Теория	Измерения
E-слой ΔN (м$^{-3}$)	$2 \cdot 10^{11}$	$0.4 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^{11}$	$5.8 \cdot 10^{11}$
F-слой ΔN (м$^{-3}$)	$4 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^{11}$	$2.3 \cdot 10^{11}$

ная). Разность между центральным и соседними профилями Ne в максимуме E-слоя достигает примерно $5.5 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$. В F-слое эта разность составляет около $2 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$.

3. ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СООТНОШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПТ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

В высокоширотной ионосфере ПТ замыкаются горизонтальными токами Педерсена. Носителями ПТ являются электроны, а носителями ионосферных токов – ионы. В месте вытекающего ПТ электроны накапливаются, и под действием возникшего здесь электрического поля ионы начинают стекаться по горизонтали к этой области. В месте втекающего в ионосферу ПТ концентрация ионосферной плазмы должна, наоборот, уменьшаться. В работах [6, 8] была сделана количественная оценка этого явления на основе аналитического решения системы уравнений непрерывности для концентрации заряженных частиц и токов, и уравнения движения для ионов:

$$\begin{gathered} Q - \alpha N = \operatorname{div}(N \cdot \vec{V}), \quad \operatorname{div}(\Sigma \cdot \vec{E}) = j_z \\ e \cdot \vec{E} + e(\vec{V} \times \vec{B}) - m\nu \cdot \vec{V} = 0, \end{gathered} \tag{1}$$

где Q – скорость ионообразования, α – коэффициент рекомбинации, N – концентрация ионов (учитывается один сорт), $\vec{V}$ – вектор скорости ионов, Σ – тензор интегральной проводимости, $\vec{E}$ – вектор напряженности горизонтального электрического поля, j_z – плотность ПТ, e – заряд иона, $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции, m – масса иона, ν – частота ионных столкновений.

Педерсеновская проводимость определяется как

$$\Sigma_P = \frac{e}{B}\int Nf(z)\,dz, \tag{2}$$

$$f(z) = \frac{\nu}{\omega}\frac{1}{1+\frac{\nu^2}{\omega^2}}, \tag{3}$$

где ω – гирочастота, z – высота. Исходя из заданного изменения величин ν и ω с высотой, можно вычислить значения функции $f(z)$. Она достигает максимума ($f = 0.5$) в E-слое на $z = 130$ км и уменьшается до 0.01 на $z = 100$ км и $z = 300$ км. Теоретическая оценка отклонения высотного профиля Ne от невозмущенного профиля Ne_0 в с учетом эффекта ПТ для условий E-слоя сведена к выражению:

$$\Delta N = 5 \cdot 10^5 f(z) j_z, \tag{4}$$

а для условий F-слоя – к выражению:

$$\Delta N = 0.5 j_z \mathrm{Ne}_0. \tag{5}$$

Спутниковые и радарные измерения для рассмотренных выше событий дают значения обеих величин: ΔN и j_z, что позволяет сравнить результаты измерений и теоретические оценки. Сводка значений параметров, измеренных во время пролетов спутников над областью радарного зондирования 5.II.2017 и 9.I.2014, и значений параметров, рассчитанных с использованием соотношений (4) и (5), приведена в табл. 1. Заметим, что значения ΔN рассчитаны для высот реально наблюдаемых максимумов E- и F-слоев, соответственно находящихся на ~120 и 250 км. То, что по формуле (3) максимальное значение f приурочено к высоте 130 км, предполагает, что именно здесь находится максимум E-слоя. Однако согласно радарным наблюдениям максимум E-слоя расположен на 10–20 км ниже. Поэтому значение $f = 0.5$ следует применить скорее к высоте наблюдаемого максимума, а не высоте 130 км. Также еще раз отметим, что в первом событии сопряженные измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях, а траектория пролета над радаром находилась в послеполуденном секторе местного времени. Во втором событии пролет над радаром попал на пик активации суббури, а траектория проходила через предполуночный сектор. Эти существенно различающиеся условия обусловили наблюдаемые большие различия в интенсивности ПТ, величине и характере изменения Ne.

Сравнение измеренных и рассчитанных значений ΔN в максимуме E- и F-слоев показывает довольно хорошее, по крайней мере по порядку величины, согласие для события 9.I.2014 в ночной ионосфере в условиях активации суббури. Для события 5.II.2017, когда измерения проходили в послеполуденном секторе, в слое F измеренные и рассчитанные значения ΔN совпадают с большой точностью. Однако в E-слое значения ΔN отличаются больше, чем на порядок. Наблюдаемые значения оказываются гораздо меньше предсказываемых теорией. Это несовпадение, надо полагать, обусловлено тем, что в спокойный период ПТ, направленные из ионосферы, переносятся потоками самых низкоэнергичных электронов с энергией не больше первых единиц килоэлектронвольт. Потоки высыпающихся частиц существенно зависят от уровня геомагнитной активности. Основной вклад в ионизацию в авроральной зоне вносят электроны с энергиями 1–10 кэВ. Электроны с энергиями 1 кэВ поглощаются в слое F, а электроны с энергией 10 кэВ в слое E. В возмущенной ночной ионосфере носители направленного вверх ПТ представлены всем энергетическим спектром, а в дневной спокойной ионосфере – только его низкоэнергичной частью. Эти особенности не учитываются в (2)–(3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Оба события, рассмотренные выше, относятся к эффекту вытекающих из ионосферы ПТ и соответствующему локальному увеличению плотности плазмы. В случае втекающих токов можно ожидать локальное уменьшение Ne, обусловленное уходом электронов вверх. Однако такой эффект выражен слабее, и в базе данных ESR не удалось обнаружить событий, в которых можно было бы надежно идентифицировать связанное с втекающим ПТ уменьшение Ne. Это может быть связано с тем, что ионосфера не может обеспечить потока электронов вверх (т.е. ПТ, направленных вниз) больше, чем создается внешней ионизацией. Может появляться продольное электрическое поле, и протоны магнитосферного происхождения могут выступать в качестве носителей тока. Отношение втекающих ПТ и ионных высыпаний не очень хорошо исследованы, т. к. поток энергии электронов почти в десять раз больше, чем поток энергии ионов (в основном протонов), и протоны не являются доминирующим источником энергии в области высоких широт. Предыдущие наблюдения показали, что, как правило, существует дисбаланс между парой противоположно направленных ПТ зон 1 и 2 и на утренней, и на вечерней стороне. Так, на вечерней стороне суммарный вытекающий ток зоны 1, больше, чем втекающий ток зоны 2 (напр., [13]). Оценка эффекта втекающего ПТ в изменении вертикального профиля Ne с уменьшением плотности ионосферной плазмы требует дополнительных исследований с использованием сопряженных радарных и спутниковых наблюдений.

Специальные радарные эксперименты проводились, главным образом в сочетании с оптическими [14]. Однако только прямые измерения ПТ дают возможность оценить соотношение плотности ПТ и локальное изменение Ne. Косвенным показателем вариаций Ne может быть изменение ионосферной проводимости. В работе [15] изучалась взаимосвязь между ПТ и интегральной проводимостью на авроральных широтах. Были проведены одновременные измерения ПТ из космоса с помощью системы спутников *AMPERE* и измерения ионосферной проводимости с помощью радара PFISR (*англ.* Poker Flat Incoherent Scatter Radar – второй, помимо ESR, радар некогерентного рассеяния, расположенный на Аляске). Результаты корреляционного анализа показали, что между проводимостью и направленным вверх ПТ существует более тесная связь по сравнению с ПТ, втекающем в ионосферу. Корреляция повышается в ночные часы и уменьшается в полуденные/утренние часы по MLT. Такая особенность может быть результатом вариаций средней энергии популяции частиц на силовых линиях аврорального геомагнитного поля. Электроны с энергиями менее 1 кэВ не вносят значительного вклада в увеличение проводимости, потому что они производят лишь небольшую ионизацию ниже 200 км. Для авроральных частиц, связанных с ПТ и имеющих средние энергии менее 1 кэВ, повышение проводимости не наблюдалось, даже если потоки высыпающихся частиц увеличивались. Статистические зависимости между ПТ и ионосферной проводимостью по данным *AMPERE* и PFISR указывают на те же эффекты, которые выявлены и оценены количественно с помощью сопряженных наблюдений *SWARM* и ESR.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы результаты сопряженных измерений КА *SWARM* и европейского радара некогерентного рассеяния ESR на Шпицбергене. Векторные магнитометры на борту КА *SWARM* обеспечивают измерения плотности продольных токов над ионосферой. Радар, находящийся в это время под траекторией пролета, измеряет вертикальное распределение электронной концентрации Ne.

Два репрезентативных события одновременных наблюдений: одно в ночной ионосфере во время активации суббури, второе в дневной ионосфере в спокойных условиях, показали, что в месте вытекающего из ионосферы продольного тока плотность плазмы увеличивается. Однако высотный профиль Ne изменяется по-разному. В

ночной ионосфере при возмущенных условиях в месте вытекающего из ионосферы продольного тока (1.8 μA/м^2) плотность плазмы растет и в слое E (примерно на $6 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$), и в слое F (на ~$3 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$). Изменение Ne по величине находится в согласии с теоретическими оценками, сделанными на основе решения уравнений непрерывности. В дневной спокойной ионосфере при вытекающем токе (0.8 μA/м^2) Ne увеличивается только в F-слое (на ~$4 \cdot 10^{10}$ м$^{-3}$), но практически не изменяется в слое E. Различия могут быть обусловлены тем, что в первом случае носители направленного вверх тока представлены всем энергетическим спектром авроральных электронов 1–10 кэВ, а во втором – только низкоэнергичной частью.

В работе использовались данные следующих измерительных комплексов, находящиеся в свободном доступе: КА *SWARM* (http://earth.esa.int/swarm), радар ESR через портал MADRIGAL (http://portal.eiscat.se/madrigal/), карты продольных токов через портал AMPERE (https://ampere.jhuapl.edu), индекс аврорального электроджета IMAGE (https://space.fmi.fi/image/www/index.php?#).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Iijima T., Potemra T.A.* The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 2165–2174. https://doi.org/10.1029/JA081i013p02165
2. *Neubert T., Christiansen F.* Small-scale, field-aligned currents at the top-side ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. Iss. 19. https://doi.org/10.1029/2003GL017808
3. *Lukianova R.* Swarm field-aligned currents during a severe magnetic storm of September 2017 // Ann. Geophysicae. 2020. V. 38. P. 191–206. https://doi.org/10.5194/angeo-38-191-2020
4. *Marklund G.* Auroral arc classification scheme based on the observed arc-associated electric field pattern // Planet. Space Sci. 1984. V. 32. P. 193–211.
5. *Aikio A.T., Lakkala T., Kozlovsky A., Williams P.J.S.* Electric fields and currents of stable drifting auroral arcs in the evening sector // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. Iss. A12. https://doi.org/10.1029/2001JA009172
6. *Ляцкая А.М., Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.* Влияние продольных токов на профиль электронной концентрации // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 8. № 2. С. 229–234.
7. *Деминов М.Г., Ким В.П., Хегай В.В.* Влияние продольных токов на структуру ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. № 4. С. 743–745.
8. *Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.* Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.
9. *Ritter P., Lühr H.* Curl-B technique applied to Swarm constellation for determining field-aligned currents // Earth Planets Space. 2006. V. 58. P. 463–476. https://doi.org/10.1186/BF03351942
10. *Lehtinen M.S., Huuskonen A.* General incoherent scatter analysis and GUISDAP // J. Atmos. Terr. Physics. 1996. V. 58. P. 438–452. https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00047-X
11. *Anderson B.J., Korth H., Waters C.L. et al.* Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 3017–3025. https://doi.org/10.1002/2014GL059941
12. *Лукьянова Р.Ю.* Экстремальные продольные токи во время магнитных бурь 24-го солнечного цикла: март 2015 г. и сентябрь 2017 г. // Космические исследования. 2020. Т. 58. № 2. С. 89–102. https://doi.org/10.31857/S0023420620020077
13. *Le G., Slavin J.A., Strangeway R.J.* Space Technology 5 observations of the imbalance of regions 1 and 2 feld-aligned currents and its implication to the cross-polar cap Pedersen currents // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. ID. A07202. https://doi.org/10.1029/2009JA014979
14. *Sugino M., Fujii R., Nozawa S. et al.* Field-aligned currents and ionospheric parameters deduced from EISCAT radar measurements in the post-midnight sector // Ann. Geophysicae. 2002. V. 20. P. 1335–1348. https://doi.org/10.5194/angeo-20-1335-2002
15. *Robinson R.M., Kaeppler S.R., Zanetti L. et al.* Statistical relations between auroral electrical conductances and field-aligned currents at high latitudes // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2020. V. 125. Art. ID. e2020-JA028008. https://doi.org/10.1029/2020JA028008