

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ *NORSAT-1* И *SWARM*

© 2021 г. А. А. Синеви^{1,2,*}, А. А. Чернышов¹, Д. В. Чугунин¹,
В. Я. Милох³, М. М. Могилевский¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Факультет физики, Университет Осло, Осло, Норвегия

*sinevich.aa@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В настоящей работе изучается пространственная структура поляризационного джета по данным ионосферных спутников *NorSat-1* и *Swarm* во время геомагнитной бури. Проведен сравнительный анализ зависимости концентрации и температуры электронов от инвариантной широты одновременно по измерениям на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время пересечения спутниками поляризационного джета. Подтверждена зависимость инвариантной широты поляризационного джета от авроральной геомагнитной активности и от местного магнитного времени. Обнаружена двойная структура поляризационного джета, а также мелкомасштабные пространственные структуры внутри джета размером в 0.1° – 0.2° . Установлено, что пространственные структуры не являются локальными и растянуты по долготе как минимум на 2 ч местного магнитного времени.

DOI: 10.31857/S0023420621060091

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) – явление субавроральной ионосферы, представляющее собой узкий по широте быстрый ионный дрейф в западном направлении вблизи проекции плазмопаузы на высотах ионосферного слоя *F*. Впервые подобное явление было обнаружено по данным спутника *Космос-184* [1, 2] после чего и получило свое название. В англоязычной литературе данное явление наиболее часто называют “субавроральный ионный дрейф” (SAID) [3]. Размер ПД по широте обычно лежит в пределах 1° – 2° , скорость дрейфа ионов на запад составляет от 0.3 до 2.5 км/с и выше, и регистрируется в секторах от 18 до 02 ч местного магнитного времени (MLT). Наибольшие значения скорости дрейфа ионов пространственно совпадают с локальными минимумами в распределении электронной концентрации в верхних слоях ионосферы, а также с повышением температуры электронов [3, 4]. Из этого следует, что ПД может влиять на распространение высокочастотных радиоволн и работу систем спутниковой навигации, что обуславливает практическую важность исследования параметров ПД.

На сегодняшний день существует множество исследований ПД с использованием как данных наземных измерений: радаров некогерентного рассеяния (например, [5, 6]) и ионозондов (на-

пример, [7–10]), так и спутниковых данных (например [3, 11–14]), а также с использованием численного моделирования [10, 15, 16]. Благодаря исследованиям стали известны многие параметры ПД, такие как, пространственное положение ПД, его размеры, вероятность появления, зависимость от геомагнитной активности, крупномасштабные особенности формирования и развития ПД и др. Однако, поскольку ранее научная аппаратура на борту спутников обладала частотой опроса максимум в несколько Гц и не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением, мелкомасштабные процессы внутри ПД практически не анализировались. Кроме того, интересно провести исследования по сопоставлению данных на разных космических аппаратах, регистрирующие ПД во время одной и той же геомагнитной бури/суббури. Для сравнения динамики развития и пространственной структуры ПД по данным различных низкоорбитальных спутников, в настоящей работе использовались наблюдения *NorSat-1* и *Swarm*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе рассмотрено четыре совместных пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C* (в 10, 13, 16 и 18 ч) во время геомагнитной бури

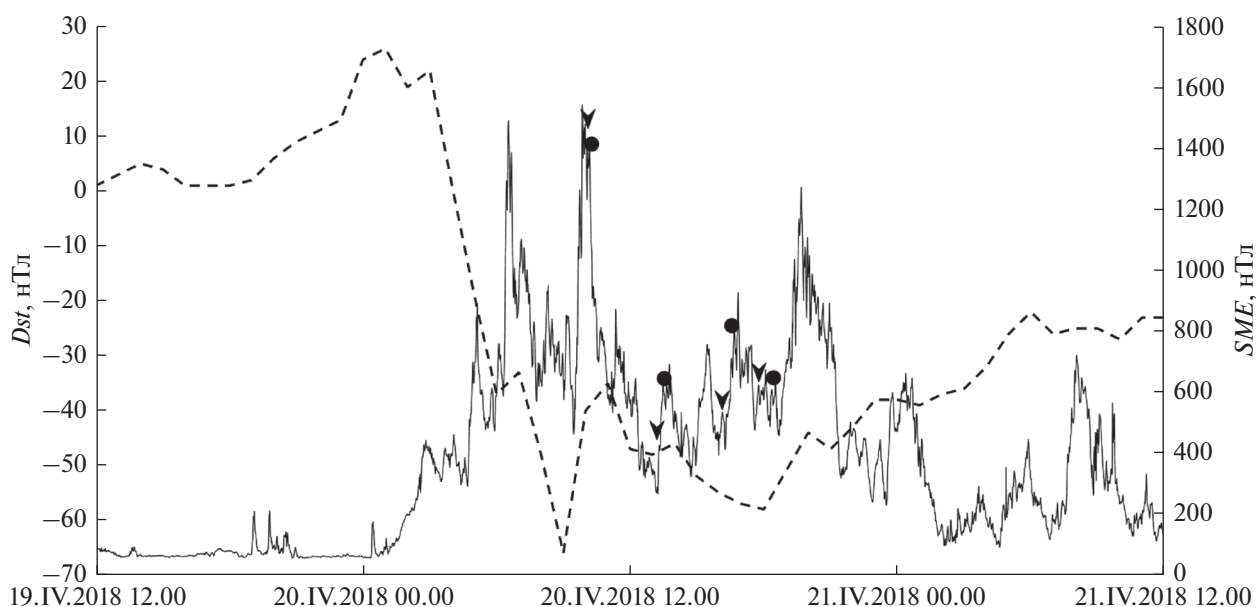


Рис. 1. Геомагнитные индексы *SME* (сплошная линия) и *Dst* (пунктир) 19–21.IV.2018. Моменты времени, в которые обнаружен поляризационный джет в каждый из рассмотренных пролетов спутника *Swarm* (*NorSat-1*), обозначены галочками (кружками).

20.IV.2018. На рис. 1 представлены графики геомагнитных индексов *SME* [17] и *Dst* [18], характеризующие геомагнитную обстановку во время данной бури. По данному рисунку можно увидеть, что фаза восстановления бури 20.IV.2018, согласно графику *Dst*, началась в ~09 UT. Поскольку по техническим причинам на спутнике *NorSat-1* не имеется данных с ~00 UT по ~09 UT, за все время бури 20.IV.2018 ПД был обнаружен в первый раз во время пролета спутников в ~10 UT. Таким образом, этот и все остальные случаи обнаружения поляризационного джета, рассмотренные в статье, произошли во время стадии восстановления геомагнитной бури.

Микроспутник *NorSat-1* проводил измерения параметров ионосферной плазмы системой цилиндрических зондов Ленгмюра с максимальной частотой опроса до 1 кГц [19], что позволяет изучать мелкомасштабную структуру ПД. Также, произведено сравнение эволюции ПД с данными спутника *Swarm C*, который проводил измерения параметров ионосферной плазмы сферическим зондом Ленгмюра с частотой 2 Гц [20]. В рассмотренные в представленной работе моменты времени оба спутника, находясь на солнечно-синхронной орбите, пролетали достаточно близко друг от друга по времени (9–26 мин) и MLT (01–02 ч MLT) на высотах ~460 км (*Swarm C*) и ~600 км (*NorSat-1*), что позволяет провести детальный анализ измерений ПД по данным обоих спутников. Изображение траекторий пролетов обоих спутников во время рассматриваемой бури 20.IV.2018 представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по наблюдениям спутников *NorSat-1* (верхняя панель) и *Swarm C* (нижняя панель) во время первого рассмотренного совместного пролета. Формулы расчета параметров плазмы по измерениям системой цилиндрических зондов Ленгмюра на спутнике *NorSat-1* приведены в работах [19, 21]. Оба спутника в момент этого пролета находились в северном полушарии и летели от полюса к экватору в секторах ~01 MLT и ~02 MLT для *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно, а по времени UT пролет *NorSat-1* в показанной области отстает от пролета *Swarm C* на ~6 мин. Поскольку измерения на спутнике *NorSat-1* проводились с номинальной частотой опроса около 1 кГц, на верхних панелях всех представленных далее рисунков приведены значения, усредненные по 100 точкам, т.е. при обработке данных применена процедура скользящего среднего.

На сегодняшний день известно, что ПД располагается внутри главного ионосферного провала (ГИП), часто у его полярной стенки на границе диффузной зоны вторжения (ГДВ) мягких электронов (Soft Electron Boundary, SEB) [4]. По данным *NorSat-1* на рис. 3 видно, что на ~54.9° инвариантной широты (Invariant Latitude, ILat) в 10.11.25 UT происходит падение электронной концентрации в ~2 раза. По данным *Swarm C* на рис. 3 также заметно падение электронной концентрации в ~1.5 раза на ~53.4° ILat в 10.04.23 UT и затем постепенное восстановление до прежних значений после ~53° ILat в 10.04.30 UT.

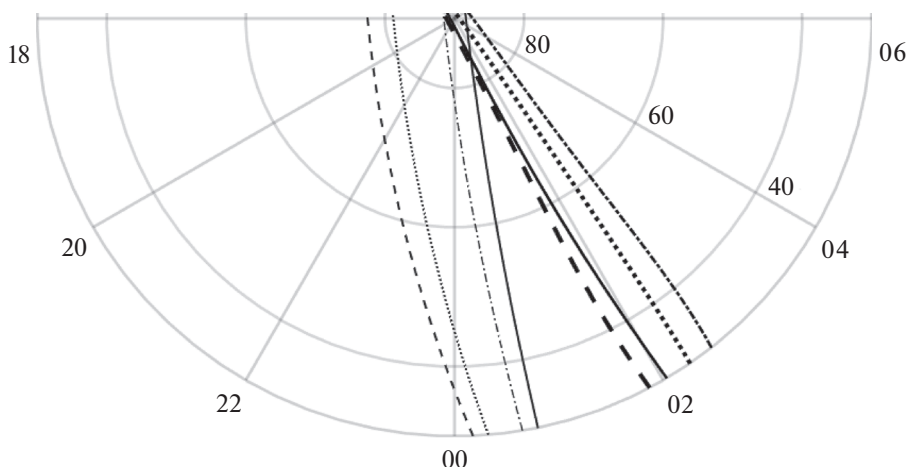


Рис. 2. Траектории четырех рассмотренных совместных пролетов спутников *NorSat-1* (тонкие линии) и *Swarm C* (жирные линии) в полярных координатах. По угловой оси отложено MLT, по радиальной оси — инвариантные широты. Первые совместные пролеты отмечены сплошной линией, вторые — штрихпунктирной линией, третьи — пунктиром, четвертые — штриховой линией.

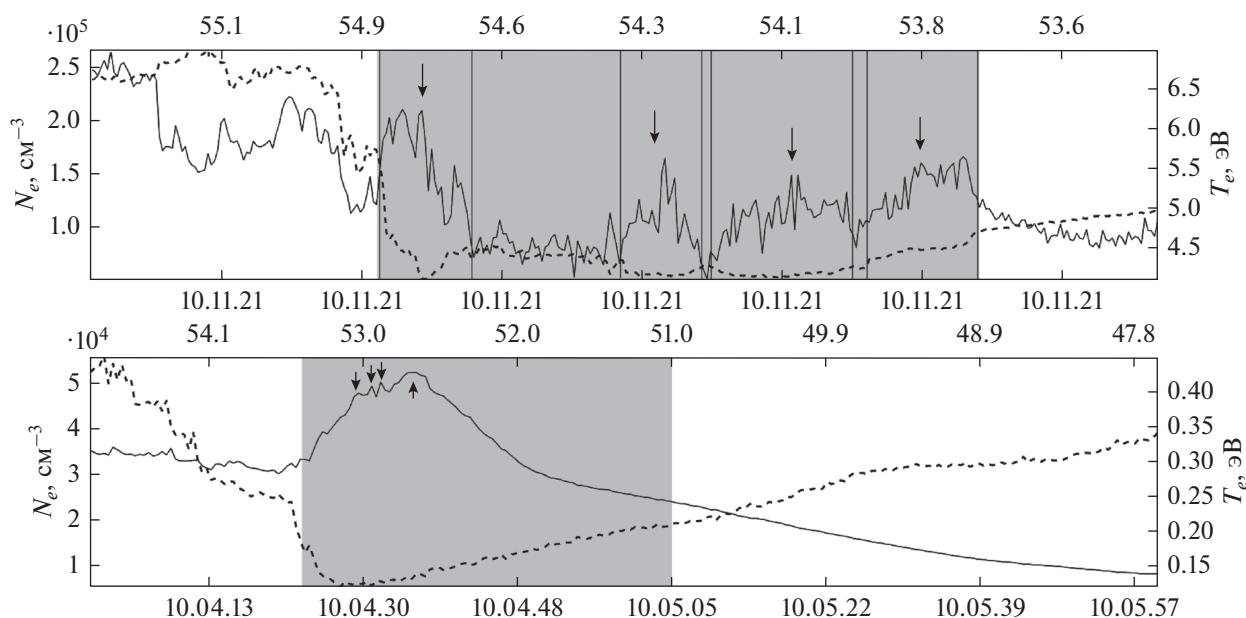


Рис. 3. Изменение температуры (сплошная линия) и концентрации электронов (пунктирная линия) во время пролета спутника *NorSat-1* в 10.11.18–10.11.51 UT (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 10.03.48–10.04.58 UT. По верхней горизонтальной оси отложена проекция геомагнитной широты вдоль магнитных силовых линий дипольной модели магнитного поля Земли на высоту 110 км. Серой областью отмечено расположение ПД. Стрелками и вертикальными линиями указаны провалы электронной концентрации внутри ПД.

С учетом вышесказанного и того факта, что оба спутника в этот момент перемещались из северного полушария в сторону южного, пересекая субавторальную область ионосферы (50° – 70° ILat), можно утверждать, что оба спутника в отрезке времени, показанном на рис. 3, пересекли SEB и ГИП. По *NorSat-1* на рис. 3 внутри ГИП видно, что на отрезке 54.9° – 53.7° ILat и 10.11.25–10.11.44 UT, прилегающем к полярной стенке ГИП, провал

электронной концентрации совпадает с подъемом электронной температуры. По наблюдениям *Swarm C* на рис. 3 виден аналогичный эффект: отрезок 53.4° – 51° ILat и 10.04.23–10.05.05 UT прилегает к полярной стенке ГИП и внутри него провал электронной концентрации и локальный подъем электронной температуры совпадают. Таким образом, можно сделать вывод, о том, что спутники *NorSat-1* и *Swarm C* во время первого

рассмотренного совместного пролета пересекали поляризационный джет, размер которого составил 1.2° широты по данным *NorSat-1* и 2.4° широты по данным *Swarm C*. Однако, размер ПД, судя по измерениям *Swarm C* в 2 раза больше, чем по *NorSat-1*, и больше, чем типичный размер ПД (1° – 2° широты [4]), позволяет предположить, что отрезок 53.4° – 51° ILat по данным спутника *Swarm C* на рис. 3 представляет собой не ПД, а так называемый “субавроральный поляризационный поток” (SAPS) [5]. Термин SAPS описывает более широкую область субавроральных широт, включающую в себя как узкие струи ПД, так и более широкие потоки ионных дрейфов [21], подразумевая, что они имеют один и тот же механизм формирования. Для определения того, чем именно является отрезок 53.4° – 51° ILat по данным спутника *Swarm C* на рис. 3: ПД или SAPS, необходимо иметь измерения скоростей дрейфа ионов, которыми мы в данном случае не обладаем.

Как явствует из результатов измерений *NorSat-1*, на рис. 3 внутри ПД за счет высокой частоты опроса спутника видны мелкомасштабные флуктуации электронной температуры, а также четыре локальных провала концентрации (на рис. 3 отмечены стрелками и вертикальными линиями), совпадающих с подъемом температуры, размером в 0.21° широты, наиболее выраженный из которых расположен у полярной стенки ПД на 54.83° – 54.66° ILat. Этот результат позволяет предположить, что внутри ПД неоднороден и, возможно, состоит из мелкомасштабных страт. Проверка данной гипотезы требует дальнейших исследований мелкомасштабной структуры ПД.

Кроме того, по данным *Swarm C* на рис. 3 видно, что внутри ПД/SAPS на $\sim 52.9^\circ$ ILat в 10.04.32 UT присутствуют два небольших пика температуры размерами $\sim 0.1^\circ$ широты, а также небольшой подъем температуры размером $\sim 0.2^\circ$ широты на $\sim 52.7^\circ$ ILat в 10.04.35 UT. Данные пики и подъемы температуры внутри ПД/SAPS, измеренные спутником *Swarm C* с частотой опроса 2 Гц, схожи по размерам и местоположению с провалами концентрации внутри ПД, измеренными спутником *NorSat-1* с частотой опроса 1 кГц. Следовательно, можно предположить, что эти два эффекта могут являться одним и тем же явлением, измеренным с разной частотой опроса. Тот факт, что поведение температуры и концентрации электронов по данным спутника *NorSat-1* хорошо соответствует поведению этих параметров по наблюдениям *Swarm C*, говорит о том, что измерения на обоих спутниках являются в достаточной мере корректными и обнаруженные неоднородности не являются локальными, а наоборот, вытянуты вдоль широты на большие расстояния, как и сам ПД. Также по рис. 3 видно, что положение ПД во время пролета спутника *NorSat-1* ($\sim 54.9^\circ$ ILat) при практически равном уровне геомагнитной активности ($SME =$

~ 1400 нТл), согласно рис. 1, отличается от положения ПД во время пролета спутника *Swarm C* ($\sim 53.4^\circ$ ILat) на $\sim 1.5^\circ$ широты. Этот факт объясняется тем, что, согласно [6], с увеличением MLT в сторону утреннего сектора, средняя ILat ПД/SAPS уменьшается.

На рис. 4 приведено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по данным спутников *NorSat-1* (верхняя панель) и *Swarm C* (нижняя панель) во время второго рассмотренного совместного пролета. В момент регистрации ПД спутники пролетали северное полушарие, с разницей по времени UT в ~ 15 мин и по MLT в ~ 01 ч. ПД во время данного совместного пролета лежит в пределах 54.7° – 53.2° ILat и 13.22.56–13.23.21 UT по данным спутника *NorSat-1* и в пределах 56.5° – 55.1° ILat и 13.08.16–13.08.40 UT по данным спутника *Swarm C*. Размер ПД по широте составляет $\sim 1.5^\circ$ и $\sim 1.4^\circ$ для спутников *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно. Внутри ПД на рис. 4 видно, что провал электронной концентрации по данным *NorSat-1* на $\sim 54.7^\circ$, совпадающий с подъемом электронной температуры, и его дальнейший плавный рост соответствует аналогичному провалу по измерениям *Swarm C* на $\sim 56.2^\circ$, который также совпадает с подъемом температуры и в сторону экватора, от которого концентрация электронов плавно растет. Кроме того, большой подъем температуры $\sim 0.8^\circ$ экваториальнее провала концентрации присутствует и на верхней и на нижней панели рис. 4. Таким образом, поведение электронной концентрации и температуры внутри ПД, а также его размер, в момент данного пролета по данным спутника *NorSat-1* хорошо соответствует поведению электронной концентрации и температуры и размеру ПД, полученные с использованием аппаратуры *Swarm C*.

Также, на рис. 4 показано, что по данным спутника *Swarm C* ПД расположен на $\sim 2^\circ$ полярнее, чем по наблюдениям *NorSat-1*. Это можно объяснить тем, что, согласно рис. 1, ПД на спутнике *Swarm C* во время второго рассмотренного совместного пролета был обнаружен в момент низкой геомагнитной активности ($SME = \sim 200$ нТл), а на спутнике *NorSat-1* – во время подъема геомагнитной активности ($SME = \sim 600$ нТл). С момента обнаружения ПД на спутнике *Swarm C* граница магнитосферной конвекции сдвинулась в сторону экватора к моменту обнаружения ПД на спутнике *NorSat-1*. Таким образом, несмотря на то, что траектория спутника *Swarm C* лежит на ~ 2 ч MLT ближе к утреннему сектору, ПД, обнаруженный по данным спутника *Swarm C*, находится полярнее, чем ПД, обнаруженный по данным спутника *NorSat-1*.

Сравнение изменений температуры и концентрации электронов во время третьего совместного пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C* пред-

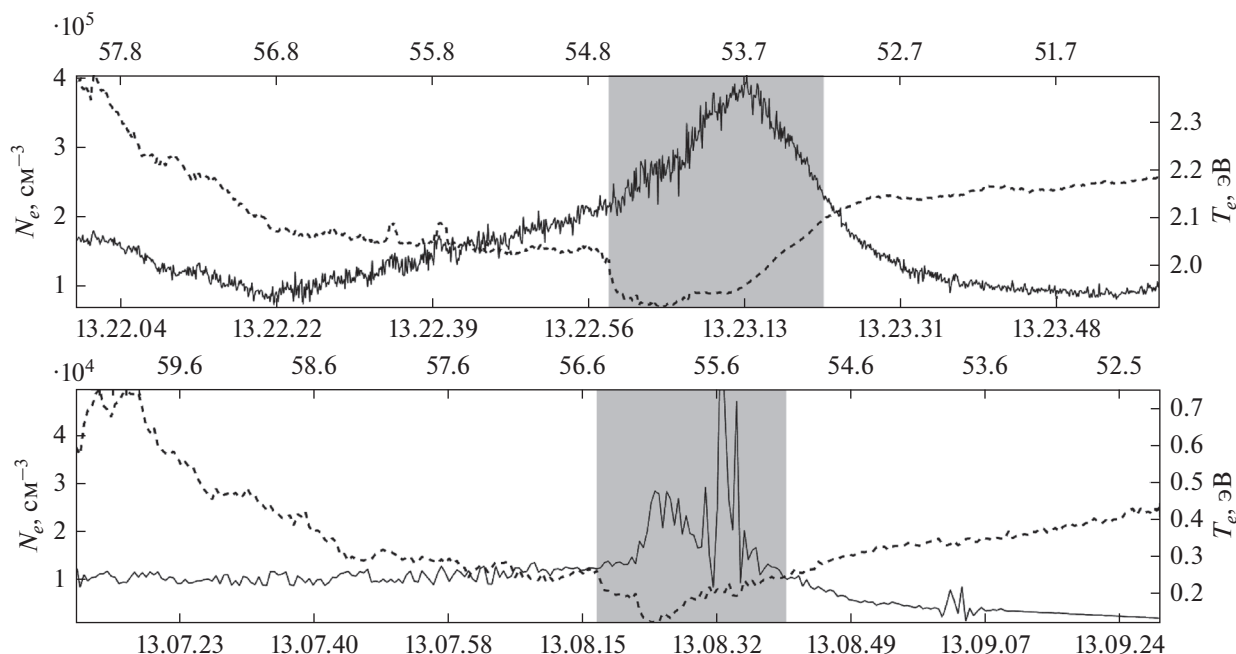


Рис. 4. Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 13.22.03–13.23.58 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 13.07.11–13.09.26 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.

ставлено на рис. 5. В момент обнаружения ПД спутники находились в северном полушарии, с разницей по времени UT в ~ 22 мин и по MLT в ~ 2 ч. ПД наблюдается на 50.3° – 48.4° ILat и в 16.36.46–16.37.18 UT по данным спутника *NorSat-1* и на 53.7° – 52° ILat и в 16.14.20–16.14.47 UT по данным спутника *Swarm C*. Поэтому размеры ПД во время пролета *NorSat-1* составляют $\sim 1.9^\circ$ широты, а во время пролета *Swarm C* – $\sim 1.7^\circ$ широты.

Необходимо отметить, что согласно рис. 5, во время третьего рассмотренного совместного пролета наблюдается наиболее похожее поведение электронной концентрации и температуры внутри ПД по данным обоих спутников среди всех рассмотренных пролетов. Также, по данным *NorSat-1* на рис. 5 наблюдается два подъема электронной температуры и соответствующие им провалы электронной концентрации внутри ПД на $\sim 53.4^\circ$ и $\sim 52.5^\circ$ ILat, совпадающие с аналогичными подъемами температуры и провалами концентрации на $\sim 49.8^\circ$ и $\sim 49.2^\circ$ по данным *Swarm C*. Это говорит о том, что двойная структура ПД по данным спутника *NorSat-1*, представленная в работе [23], наблюдается также и по данным спутника *Swarm C*. Как было упомянуто выше, это говорит о том, что неоднородности внутри ПД являются не локальными, а вытянуты вдоль широты.

Расположение ПД, зарегистрированного на *Swarm C*, на $\sim 3^\circ$ широты полярнее ПД, зарегистрированного на *NorSat-1*, во время третьего

пролета объясняется тем же явлением, что и во время второго пролета, поскольку, согласно рис. 1, ПД на спутнике *Swarm C* во время третьего пролета был обнаружен в момент более низкой геомагнитной активности ($SME = \sim 500$ нТл), а на *NorSat-1* – во время более высокой геомагнитной активности ($SME = \sim 800$ нТл).

На рис. 6 представлено сравнение изменений электронной температуры и концентрации во время четвертого совместного пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C*. Разница по времени UT между спутниками во время данного пролета достигала ~ 26 мин, оба спутника в этот момент находились в северном полушарии в секторах ~ 00 MLT и ~ 02 MLT для *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно. ПД по данным спутника *NorSat-1* расположен в пределах от $\sim 49.05^\circ$ до $\sim 47.7^\circ$ ILat (18.13.57–18.14.20 UT) и на 50.4° – 49° ILat и в 17.48.16–17.48.39 UT по данным спутника *Swarm C*. Размер ПД во время пролета *NorSat-1* и *Swarm C* приблизительно одинаков и составляет $\sim 1.4^\circ$ широты. Экваториальная граница ПД согласно наблюдениям *NorSat-1*, которая во время предыдущих пролетов была менее выраженной, чем полярная, во время данного пролета стала еще более размыта, поэтому ее положение и ширина ПД определены с большой неточностью.

По данным *NorSat-1* на рис. 6 внутри ПД на 49.05° – 48.55° (18.13.57–18.14.05 UT) и на 48.5° – 47.7° ILat (18.14.06–18.14.20 UT) видно два участка

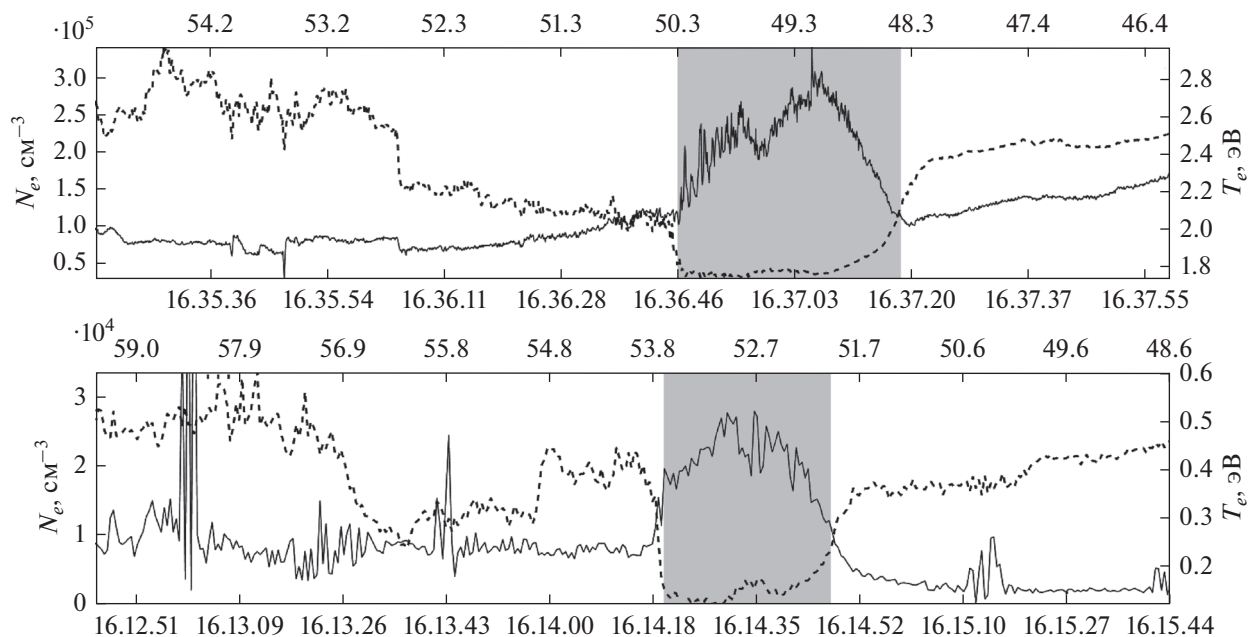


Рис. 5. Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 16.35.18–16.37.57 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 16.12.44–16.15.44 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.

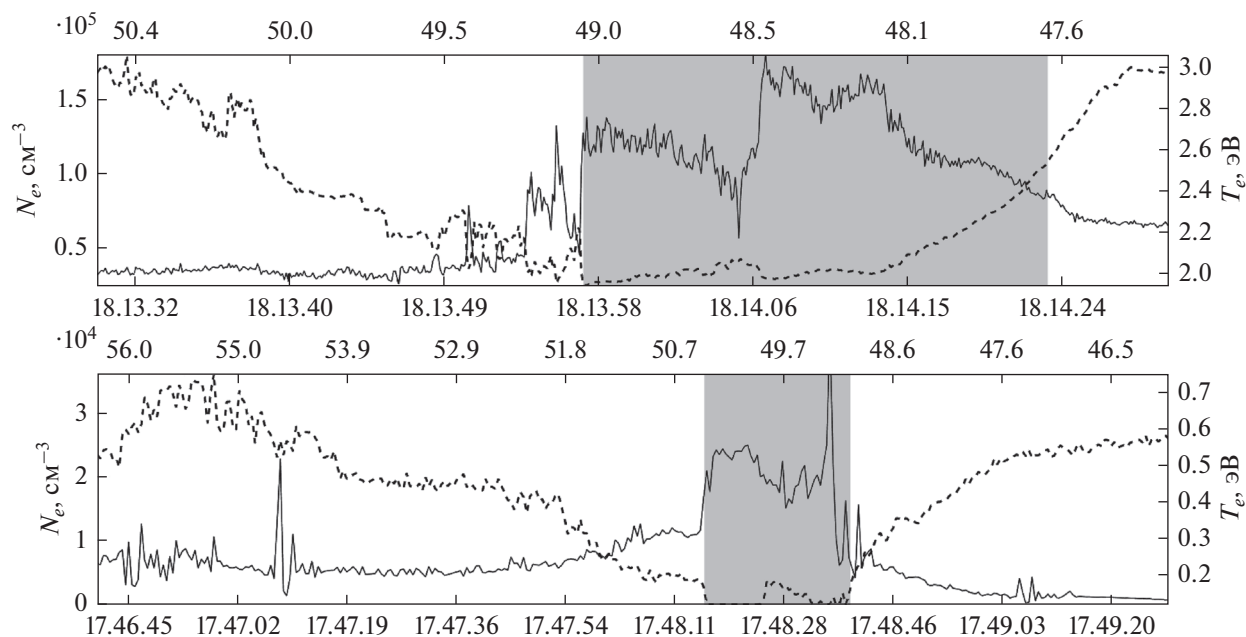


Рис. 6. Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 18.13.30–18.14.30 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 17.46.42–17.49.28 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.

повышенной электронной температуры, совпадающие со слабо выраженными понижениями электронной концентрации. Как было упомянуто выше, подобные участки наблюдаются и на рис. 5. В [23] сделано предположение, что данные участ-

ки представляют собой двойную структуру ПД, которая имеет сходства с DSAID (Double-peak Subauroral Ion Drift). DSAID был впервые описан в работе [24], где использовались данные DMSP, а позже эти результаты были подтверждены в ста-

тье [25] с привлечением не только измерений DMSP, но и Van Allen Probes (RBSP). По данным *Swarm C* на рис. 6 внутри ПД также заметны два участка повышенной температуры, совпадающие с провалами концентрации, на 50.4° – 49.9° ILat (17.48.16–17.48.27 UT) и на 49.5° – 49° ILat (17.48.30–17.48.39 UT). Стоит отметить, что провалы электронной концентрации по данным *Swarm C* заметно более выражены, чем участки понижения электронной концентрации по *NorSat-1*. С учетом вышеизложенного можно утверждать, что ПД, зарегистрированный во время третьего и четвертого рассмотренных совместных пролетов спутников *NorSat-1* и *Swarm C*, имеет двойную структуру, вероятно представляющую собой DSAID.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе проведено сравнение динамики развития ПД с использованием результатов измерений на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время геомагнитной бури 20.IV.2018, а также исследование мелкомасштабной пространственной структуры ПД. Результаты наблюдений параметров плазмы внутри ПД получены на космическом аппарате *NorSat-1* с помощью системы зондов Ленгмюра, имеющей номинальную частоту опроса до 1 кГц, позволили провести измерения с высоким временным разрешением, что соответствует пространственному разрешению вплоть до десятков метров. Проведен сравнительный анализ результатов зависимости концентрации и температуры электронов от геомагнитной широты (проекция по дипольной модели магнитного поля Земли на высоту 110 км, ILat) одновременно по данным спутников *NorSat-1* и *Swarm C* во время их пересечения ПД.

Хорошее совпадение поведения таких параметров ионосферной плазмы внутри ПД как температура и концентрация электронов согласно наблюдениям *NorSat-1* и *Swarm C* говорит о том, что система многоигольных зондов Ленгмюра на борту *NorSat-1* и сферический зонд Ленгмюра на спутнике *Swarm C* дают похожие результаты. Несмотря на разницу в высоте орбит в ~ 140 км и в долготе в ~ 2 ч MLT, на графиках плазменных параметров по измерениям на обоих спутниках наблюдаются схожие структуры. Сходство поведения температуры и концентрации электронов на высотах ~ 450 и ~ 600 км можно объяснить тем, что ПД по данным обоих космических аппаратов обнаружен близко (разница 1° – 3°) по проекции геомагнитной широты по дипольной модели магнитного поля Земли (ILat). Поскольку ПД вызывается электрическими полями, проецированными на ионосферу из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля Земли [26], в точках ионосферы, расположенных на разных высотах в

пределах области F, но имеющих одинаковую координату ILat, структура ПД остается идентичной. Сходство поведения плазменных параметров внутри ПД на разных долготах (на 00–01 и ~ 02 MLT) объясняется тем, что, согласно [3], в среднем ПД является растянутым по долготе от 18 до 02 ч MLT. Таким образом, предполагается, что ПД, обнаруженный по измерениям *NorSat-1* и по измерениям *Swarm C*, представляет собой одно и то же явление.

Согласно проведенному анализу результатов для первого рассмотренного пролета, при равном уровне геомагнитной активности ($SME = \sim 1400$ нТл) ПД по *NorSat-1* расположен полярнее, чем по *Swarm C* на $\sim 1.5^{\circ}$. Это объясняется тем, что, как показано в [6], инвариантная широта ПД/SAPS уменьшается с увеличением MLT в сторону утреннего сектора. Во время остальных рассмотренных пролетов наблюдается уменьшение ILat ПД с увеличением авроральной геомагнитной активности, что согласуется с результатами работы [27].

В настоящей работе по данным *Swarm C* обнаружено наличие двойной структуры ПД, вероятно представляющей собой так называемый DSAID, обнаруженный ранее на спутнике DMSP [24] и *NorSat-1* [23]. Объяснение механизма возникновения и развития данного явления представлено в работах [24, 25] и [28]. В [24] предполагается, что источником DSAID может являться магнитосферный генератор тока. Большие азимутальные градиенты ионного давления в экваториальной плоскости вызывают относительно большие продольные токи (Field-Aligned Current, FAC). Взаимодействия волна-частица могут создавать многослойные структуры продольных токов. Электрические поля ионосферы регулируются соответствующим образом, чтобы обеспечить ток, необходимый для магнитосферы, когда продольные токи втекают в ионосферу в области низкой проводимости, связанной с ГИП. Если заданных нисходящих продольных токов недостаточно для возврата всего ионосферного тока Педерсена в области низкой проводимости, ток может быть вынужден создать другой канал, что приведет к появлению нескольких коротко замкнутых цепей, каждая из которых генерирует большие субавроральные полярные электрические поля и последующий сильный дрейф ионов на запад. Результаты [25] подтверждают, что DSAID действительно связаны с продольными токами в области 2 (R2 FAC), протекающими в области с низкой проводимостью. Авторы статьи [28] развивают данный подход, связывая случаи появления DSAID с циклом конвекции Данжи, а также показывают, что вышеупомянутые коротко замкнутые цепи иногда действуют как генератор тока, а иногда как генератор напряжения.

Также согласно результатам, полученным в настоящей работе, двойная структура ПД, а также поведение плазменных параметров внутри ПД, в целом, совпадает в секторе 00–01 MLT и в секторе ~02 MLT. На основании этого можно утверждать, что вышеописанные структуры не являются локальными и растянуты по долготе как минимум на ~2 ч MLT. Кроме того, вытянутыми минимум на ~2 ч MLT являются обнаруженные в ходе представленного исследования структуры внутри ПД размером 0.1° – 0.2° широты, которые могут являться более мелкомасштабными стратами ПД. Проверка данного предположения требует дальнейших спутниковых исследований (in situ) мелкомасштабной структуры ПД.

ВЫВОДЫ

Во время геомагнитной активности по данным спутников *NorSat-1* и *Swarm C* обнаружен ПД и изучена его пространственная структура. Проведен сравнительный анализ зависимости плотности и температуры электронов от проекции геомагнитной широты на высоту 110 км одновременно по измерениям на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время их пересечения ПД. В процессе исследования были получены следующие основные результаты:

- Внутри ПД обнаружены мелкомасштабные пространственные структуры размером в 0.1° – 0.2° широты.
- Подтверждена зависимость инвариантной широты ПД от авроральной геомагнитной активности и от MLT.
- Внутри ПД обнаружена двойная пространственная структура, вероятно являющаяся DSAID.
- Пространственные структуры внутри ПД не являются локальными и растянуты по MLT как минимум на 2 ч MLT.

Мы благодарны Мировому центру данных по геомагнетизму в Киото [<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp>], организациям и национальным агентствам, входящим в SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu/info>], за предоставление данных по индексам геомагнитной активности, а также Европейскому Космическому Агентству (ESA) за доступ к данным спутниковой миссии *Swarm* [https://Swarm-diss.esa.int/#Swarm/Advanced/Plasma_Data], и Университету Осло и лично Лассе Клаусену за доступ к измерениям зондов Ленгмюра на спутнике *NorSat-1* [<http://tid.uio.no/plasma/norsat>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. I. Вопросы методики и некоторые результаты измерений в

магнитно-спокойное время // Космич. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 273–283.

2. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. // Космич. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 284–296.
3. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. Is. 8. P. 657–660. <https://doi.org/10.1029/GL006>
4. Anderson P.C., Heelis R.A., Hans W.B. The Ionospheric Signatures of Rapid Subauroral Ion Drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A4. P. 5785–5792. <https://doi.org/10.1029/90JA02651>
5. Foster J.C., Burke W.J. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // EOS Trans. AGU. 2002. V. 83. P. 293–294. <https://doi.org/10.1029/2002EO000289>
6. Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № A12. P. 1475. <https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
7. Бондарь Е.Д., Халипов В.Л., Степанов А.Е. Характеристики поляризационного джета по измерениям на субавроральных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска // Солнечно-земная физика. 2005. № 8. С. 143–144.
8. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бондарь Е.Д. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббури // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56. № 2. С. 187–193. <https://doi.org/10.7868/S0016794016020085>
9. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017.
10. Степанов А.Е., Гололюбов А.Ю., Халипов В.Л., Голиков И.А. Вариации ионосферных параметров при формировании поляризационного джета. // Геомагнетизм и аэрномия. 2021. Т. 61. № 1. С. 60–65. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010156>
11. Anderson P.C., Carpenter D.L., Tsuruda K. et al. Multi-satellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID) // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № A12. P. 29585–29599. <https://doi.org/10.1029/2001JA000128>
12. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А. и др. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56. № 5. С. 568–578. <https://doi.org/10.7868/S0016794016050060>
13. Mishin E.V., Nishimura Yu., Foster J. SAPS/SAID revisited: A causal relation to the substorm current wedge // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 112. Is. 8. P. 8516–8535. <https://doi.org/10.1002/2017JA024263>

14. *Mishin E.V., Puhl-Quinn P.A.* SAID: Plasmaspheric short circuit of substorm injections // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. Is. 24. P. L24101. <https://doi.org/10.1029/2007GL031925>
15. *Galperin Yu.I.* Polarization jet: characteristics and a model // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. № 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-391-2002>
16. *de Keyser J.* Storm-Time Energetic Particle Penetration Into the Inner Magnetosphere as the Electromotive Force in the Subauroral Ion Drift Current Circuit // *Washington DC American Geophys. Union. Geophys. Monograph.* 2000. V. 118. P. 261–265. <https://doi.org/10.1029/GM118p0261>
17. *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № A12211. <https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
18. *Nose M., Iyemori T., Sugiura M., Kamei T.* Geomagnetic Dst index. Kyoto: World Data Center for Geomagnetism, 2015. <https://doi.org/10.17593/14515-74000>
19. *Hoang H., Clausen L.B.N., Røed K. et al.* The Multi-Needle Langmuir Probe System on Board *NorSat-1* // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Is. 4. P. 75. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0509-2>
20. *Knudsen D.J., Burchill J.K., Buchert S.C. et al.* Thermal ion imagers and Langmuir probes in the *Swarm* electric field instruments // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. Is. 2. P. 2655–2673. <https://doi.org/10.1002/2016JA022571>
21. *Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Frolov V.L. et al.* In situ observations of ionospheric heating effects: first results from a joint SURA and NorSat-1 experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. Is. 13. <https://doi.org/10.1029/2020GL088462>
22. *Yeh H.C., Foster J.C., Rich F.J., Swider W.* Storm time electric field penetration observed at mid-latitude // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. Is. A4. P. 5707–5721. <https://doi.org/10.1029/90JA02751>
23. *Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др.* Исследование мелкомасштабной структуры поляризованного джета во время геомагнитной бури 20.IV.2018 // *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7. № 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.12737/szf-71202103>
24. *He F., Zhang X.-X., Wang W., Chen B.* Double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs) // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 5554–5562. <https://doi.org/10.1002/2016GL069133>
25. *Wei D., Yu Y., Ridley A.J. et al.* Multi-point observations and modeling of subauroral polarization streams (SAPS) and double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs): A case study // *Adv. Space Res.* 2019. V. 63. P. 3522–3535. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.004>
26. *Southwood D.J., Wolf R.A.* An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection. // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 5227–5232.
27. *Karlsson E., Marklund G., Blomberg L., Malkki A.* Subauroral electric fields observed by Freja satellite: A statistical study // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 4327–4341. <https://doi.org/10.1029/97JA00333>
28. *Horvath I., Lovell B. C.* Investigating the development of double-peak subauroral ion drift (DSAID) // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. P. 4526–4542. <https://doi.org/10.1002/2016JA023506>