

**ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ
БУРИ 27–28 МАЯ 2017 ГОДА**

© 2020 г. Д. С. Котова^{1,2*}, И. Е. Захаренкова¹, М. В. Клименко¹, В. Б. Оводенко¹,
И. В. Тютин^{3,4}, Д. В. Чугунин^{1,5}, А. А. Чернышов^{1,5}, К. Г. Ратовский⁶, Н. В. Чирик¹,
М. В. Успенский⁷, В. В. Клименко¹, Р. А. Рахматулин⁶, А. Ю. Пашин⁶,
А. В. Дмитриев^{4,8}, А. В. Суворова^{4,8}

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Физический факультет Университета Осло, Осло, Норвегия

³ОАО “Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт
дальней радиосвязи”, Москва, Россия

⁴Институт ядерной физики им. М.В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁶Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

⁷Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

⁸Национальный центральный университет, Таоюан, Тайвань

*E-mail: darshu@ya.ru

Поступила в редакцию 20.02.2019;
после доработки 07.05.2019;
принята в печать 20.05.2019

В данной статье представлены результаты исследования ионосферных неоднородностей различного масштаба, полученных на основе мультиинструментальных данных в восточно-сибирском регионе России во время геомагнитной бури 27–28 мая 2017 года. Пространственные неоднородности электронной концентрации в ионосфере были зарегистрированы по данным наземных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и на основе прямых измерений электронной концентрации на низкоорбитальных спутниках. По данным УКВ-радара была выявлена интенсивная радиоаврора сразу после начальной фазы геомагнитной бури. Вместе с тем мы зарегистрировали флуктуации полного электронного содержания ионосферы по данным GPS-приемников и наличие неоднородностей E-слоя по данным ионозонда в Норильске. Время регистрации неоднородностей на различных инструментах согласуется с пространственно-временными изменениями продольных токов второй зоны, полученных по данным магнитометров низкоорбитальной спутниковой системы Iridium в рамках проекта AMPERE.

Ключевые слова: ионосферные неоднородности, радиоаврора, продольные токи Биркеланда, авроральные высыпания, высокоширотная ионосфера.

DOI: 10.31857/S0207401X20040093

ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная ионосфера представляет собой сильно структурированную среду, в которой формируется большое количество плазменных неоднородностей различных масштабов — от метров до сотен километров [1]. Ионосферные неоднородности могут быть классифицированы по широте в соответствии с подразделением высокоширотной ионосферы на субавроральную и авроральную ионосферу, полярную шапку и зону касп/клефт. Высокоширотные неоднородности главным об-

разом являются результатом действия процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия, ассоциированных с авроральной активностью, в частности с фотохимическими процессами с учетом ударной ионизации энергичными магнитосферными частицами и процессами переноса и разогрева плазмы за счет электрических полей и продольных токов. В работе [2] обсуждаются механизмы воздействия различных энергичных частиц на атмосферу. В свою очередь, плазменные неоднородности и аэрономические эффекты в ионосфере могут оказывать существенное влияние

на качество спутниковой и коротковолновой (КВ) радиосвязи, функционирование радиолокационных станций (РЛС) и навигационных спутниковых систем. Основные представления об образовании в высокоширотной ионосфере неоднородностей плазмы различных масштабов и об их влиянии на радиосвязь приведены в ряде монографий [3–7]. Отдельно были рассмотрены вопросы влияния ионосферных неоднородностей в высоких широтах на функционирование РЛС [8–10].

Высокоширотная ионосфера — одна из основных областей локализации интенсивных мелкомасштабных неустойчивостей и неоднородностей в электронной плотности [11–14], которые могут быть связаны с электрическими полями и интенсивными высыпаниями высокоэнергичных частиц в этой области. Кроме того, кинетические процессы на малых масштабах могут оказывать заметное влияние на крупномасштабные процессы в высоких широтах, приводящие к нагреву и формированию потоков ионов, а также к образованию областей с повышенной плотностью плазмы [15]. Высыпания высокоэнергичных заряженных частиц приводят не только к модификации профиля фоновой электронной концентрации, но и к тому, что ионосферная плазма становится более нерегулярной. В результате трансionoсферные радиосигналы навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС испытывают более сильные по сравнению со среднеширотной ионосферой сцинтилляции при переходе через такую нерегулярную среду. Это может приводить к неоднозначности работы алгоритмов коррекции эмпирических моделей ионосферы по данным приемников сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), расположенных в высокоширотном регионе [16]. Как продемонстрировано в статье [17], где исследовалась умеренная суббурия, имеет место одновременное увеличение полного электронного содержания (ПЭС — Total Electron Content (ТЕС)) и фазовых сцинтилляций, полученных с помощью GPS-приемника, а также увеличенный поток тепловых электронов в ионосферу, что было установлено по измерению низкоорбитальными спутниками DMSP.

В периоды геомагнитных бурь наибольшее количество сбоев навигационных измерений и, соответственно, определения ПЭС находится вблизи аврорального овала [18]. В работах [19, 20] показана необходимость проведения детальных исследований влияния ионосферы на распространение навигационных сигналов в высокоширотных областях. Динамика сбоев параметров навигационных сигналов GPS в период с 2010 по 2014 гг. изучена в статье [21] для станций, расположенных в Арктическом регионе. Проведен анализ вероятностей “инструментальной” потери фазы и псевдодальности, а также кратковременных вариаций большой скорости изменения ПЭС

в различных геомагнитных условиях. Показано, что вероятности сбоя для ПЭС намного выше (в 100–200 раз), чем инструментальные сбои, и значительно растут во время геомагнитных бурь и суббурь. Также необходимо отметить, что из-за рассеяния навигационного сигнала на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации (с размером неоднородности порядка размера первой зоны Френеля, составляющего — 100–300 м) наблюдаются сильные сцинтилляции амплитуды и фазы сигналов в GPS-приемнике [22, 23]. В работе [24] показана связь мерцаний амплитуды сигнала на рабочей частоте GPS L1 со срывами приема данного сигнала. Радары УКВ-диапазона, функционирующие в высоких широтах, также подвержены влиянию ионосферных неоднородностей. В работах [25–27] была показана связь между сцинтилляциями и качеством радиолокационных измерений, а именно амплитуды и фазы сигнала. Данные характеристики особенно важны для радиолокационных станций (РЛС), поскольку они определяют вероятность обнаружения целей.

Для исследования причин формирования и связи пространственной структуры и динамики ионосферных неоднородностей различных масштабов во время геомагнитной бури в данной статье мы использовали мультиинструментальный подход. В качестве примера нами был выбран период умеренной геомагнитной бури 27–28 мая 2017 года. Выбор данного периода был продиктован наличием данных РЛС, зона действия которой охватывает регион Норильска. Мультиинструментальный подход основан на использовании спутниковых и наземных данных, характеризующих как ионосферные неоднородности различных масштабов, так и влияние магнитосферы на ионосферу в рассматриваемом регионе. В качестве источника информации для мультиинструментального исследования в высокоширотном Восточно-Сибирском регионе в период с 27 по 28 мая 2017 года мы использовали данные наземных ГНСС-приемников, УКВ-радаров, низкоорбитальных спутников Swarm и DMSP, станции вертикального зондирования ионосферы, наземных магнитометров и магнитометров орбитальной спутниковой группировки AMPERE (Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment). Использование такого набора систематизированных и взаимодополняющих данных позволяет оценить наличие связей в появлении ионосферных неоднородностей различного масштаба на разных высотах ионосферы: в E- и F-областях ионосферы, а также во внешней ионосфере.

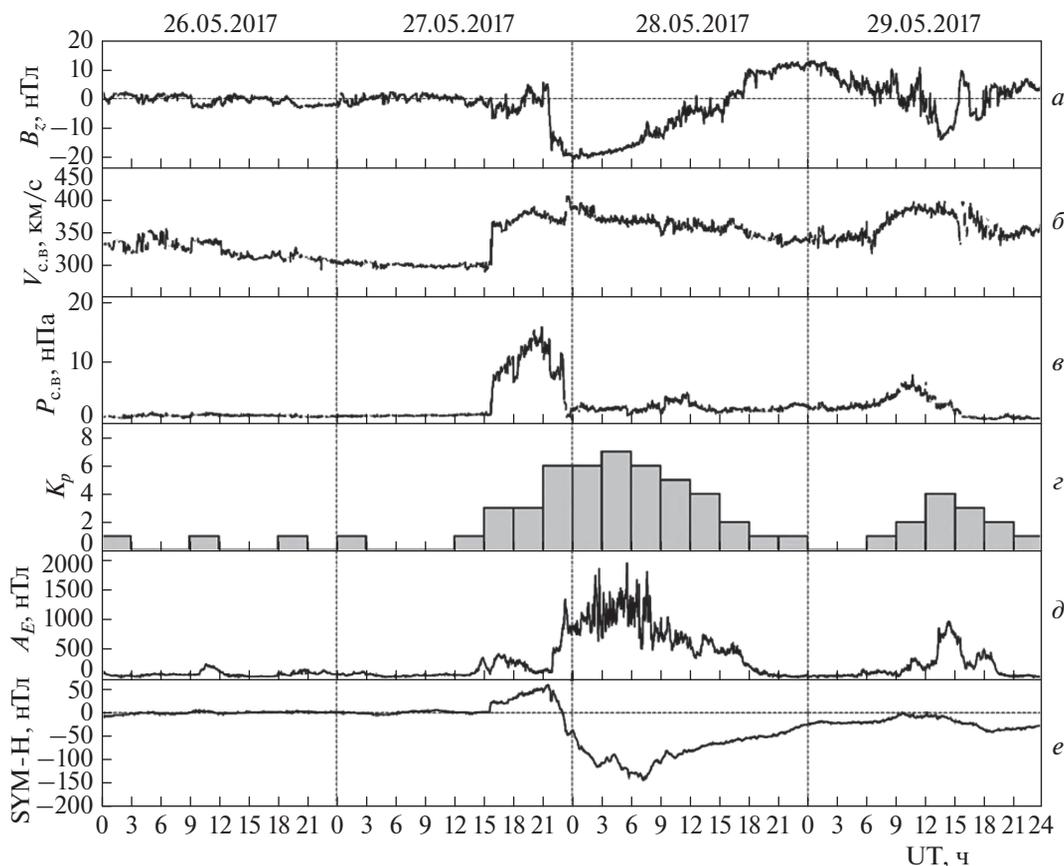


Рис. 1. Вариации межпланетного магнитного поля (ММП), параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов 26–29 мая 2017 г. (сверху вниз): B_z -компонента ММП (а), скорость и динамическое давление солнечного ветра (б, в), трехчасовой глобальный индекс геомагнитной активности K_p (г), индекс аврорального электроджета A_E (д) и индекс развития кольцевого тока SYM-H (е).

1. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ЯВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В данном исследовании нами рассмотрен ионосферный отклик на геомагнитную бурю 27–28 мая 2017 года. На рис. 1 показаны параметры и индексы, характеризующие гелиогеофизическую обстановку в период с 26 по 29 мая 2017 года и полученные из базы данных OMNI. Умеренная геомагнитная буря началась 27 мая 2017 года после 15 UT. Рассматриваемая буря характеризовалась довольно продолжительной фазой внезапного начала. Главная фаза бури пришлась на переход с 27 на 28 мая по времени UT и характеризовалась падением значения D_{st} -индекса до -125 нТл в 07 UT 28 мая. Максимальное значение A_E -индекса наблюдалось в период с 04 до 08 UT 28 мая и достигло значений ~ 1500 нТл. Фаза восстановления геомагнитной бури началась примерно в 10 UT 28 мая 2017 года и продлилась до 12 UT 29 мая.

Исследуемая геомагнитная буря первоначально была инициирована быстрыми изменениями в скорости и давлении солнечного ветра. Следующее развитие бури возникло после переворота

B_z -компоненты межпланетного магнитного поля с северной на южную. Как видно из рис. 1, поведение K_p -индекса хорошо согласуется с поведением B_z -компоненты.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

2.1. Обнаружение ионосферных неоднородностей различных масштабов

К настоящему моменту измерения временных задержек распространения радиосигналов навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС являются одним из основных источников для мониторинга состояния ионосферы в глобальном масштабе в спокойных и возмущенных условиях. В работе [23] были введены в использование для наземных GPS-измерений две новые метрики – ROT и ROTI. Метрика ROT (Rate of TEC) представляет собой скорость изменения ПЭС на 1-минутном интервале и является индикатором наличия фазовых флуктуаций сигнала. Метрика ROTI (Rate of TEC Index) как стандартное отклонение ROT на фиксированном временном интервале,

характеризует интенсивность фазовых флуктуаций и используется для детектирования плазменных неоднородностей и пространственных градиентов. Эти метрики широко используются в сервисах космической погоды, а также в исследованиях высокоширотных и экваториальных плазменных неоднородностей по данным наземных GPS-приемников [19, 28, 29].

В настоящей работе для исследования возникновения ионосферных неоднородностей во время геомагнитных возмущений был проведен анализ GPS-данных с трех наземных станций: NRIL (Норильск, 69.3° с.ш., 88.3° в.д.), DIKS (Дикси, 73.5° с.ш., 80.4° в.д.) и NOVМ (Новосибирск, 55.0° с.ш., 82.9° в.д.). Географическое расположение станций показано на приведенном ниже рис. 3. Данные станции предоставляют GPS-измерения с временным разрешением в 30 с, что позволяет использовать их для детектирования неоднородностей с пространственными масштабами в десятки-сотни километров. Для этого был проведен расчет вариации метрики ROT для всех видимых GPS-спутников (угол возвышения составлял более 20°) над станцией на суточном интервале. Данный вид измерений позволяет мониторить ионосферу в радиусе $\sim 7^\circ$ – 10° относительно положения станции в горизонтальном масштабе. Дополнительно нами были использованы прямые (*in situ*) измерения электронной концентрации на высоте ~ 460 км по данным спутников Swarm и на высоте ~ 800 км по данным спутника DMSP F16.

Для исследования неоднородностей в нижней ионосфере (E-область) мы провели анализ радиоэхо, зарегистрированных мощным крупноапертурным радаром УКВ-диапазона с северной ориентацией зоны обзора, расположенным в районе Красноярска (56° с.ш., 93° в.д.). Этот радар охватывает дальности до 2000 км в азимутальном секторе $\sim 100^\circ$ на угле места 3° . Период измерений радара составляет 5 с. Минимальный ракурсный угол для данного радара составляет 3° , что определяет принципиальную возможность наблюдения радиоавроры. Мы проанализировали диапазон высот от 80 до 150 км среди всех данных радара. Радиоэхо на высотах ~ 90 – 130 км соответствует: 1) радиоавроре [9, 30] – обратному ракурсному рассеянию радиоволн на магнитоориентированных ионосферных неоднородностях (МОН) с продольным размером, равным половине длины волны сигнала радара, т.е. примерно 35 см; 2) метеорным эхо [31] – радиоэхо от ионизированных следов метеоров, а также от их головной части.

Для регистрации ионосферных неоднородностей в КВ-диапазоне нами использовались данные ионозонда DPS-4, расположенного в Норильске. Станция вертикального зондирования работает с интервалом в 15 мин. Данные ионограмм были проанализированы, что позволило выявить моменты

появления спорадического слоя E-, F-рассеяния и полного поглощения радиосигнала (блэкаут) и сопоставить эти моменты с формированием неоднородностей, обнаруженных другими средствами.

2.2. Наблюдения параметров магнитосферно-ионосферного взаимодействия

Для анализа отклика локальных вариаций геомагнитного поля на геомагнитную бурю в работе были использованы данные магнитометра в Норильске (геомагнитные координаты: 59.9° с.ш., 166.7° в.д.). Обслуживание и обработка данных этого магнитометра осуществляется в Институте солнечно-земной физики СО РАН. В данном исследовании мы проанализировали изменения вертикальной компоненты геомагнитного поля dZ в виде разности значений этой компоненты в спокойных и возмущенных условиях: $dZ = Z_s - Z_q$, где Z_s и Z_q представляют собой вертикальные компоненты магнитного поля во время бури и для спокойного дня соответственно. В данном случае данные за 26 мая 2017 года использовались в качестве Z_q , а данные за 27 и 28 мая были выбраны в качестве Z_s . Отметим, что ось Z направлена в зенит.

Для исследования широтно-временной изменчивости системы продольных токов Биркеланда в период рассматриваемого события нами были использованы данные магнитометров спутниковой системы Иридиум, содержащей более 70 низкоорбитальных спутников (высота орбиты – 780 км). Проект AMPERE [32] использует спутники с наклоном, составляющим 86° , которые равномерно распределены между шестью одинаково расположенными орбитальными плоскостями. Это позволяет получать информацию по радиальной плотности тока, вычисленной в скорректированной геомагнитной системе координат. Спутниковая группировка AMPERE обеспечивает глобальные наблюдения продольных токов первой, второй и третьей зон над северными и южными высокоширотными регионами в интервале широт от 90° до 50° . Кроме того, для определения границы авроральных высыпаний и скоростей горизонтальных электромагнитных дрейфов мы использовали данные спутников DMSP.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Широтные границы ионосферных неоднородностей на разных высотах

На рис. 2 представлена зависимость радиоэхо (радиоаврора и метеорные эхо), зарегистрированных в диапазоне высот 90–130 км в период времени с 23:20 до 23:30 UT 27 мая 2017 года. Измеряемые радаром координаты: дальность, азимут и угол места, были пересчитаны в географические

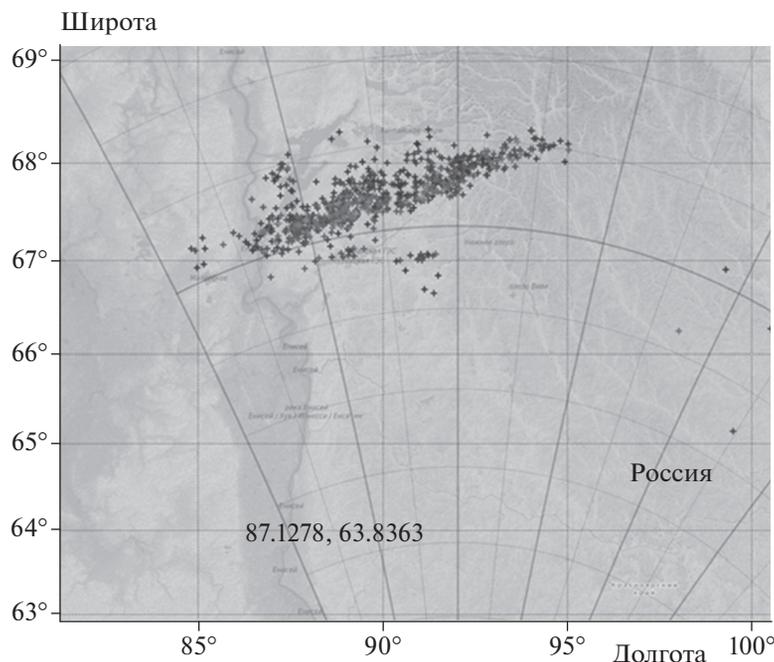


Рис. 2. Радиоэхо в диапазоне высот 90–130 км в координатах широта–долгота, зарегистрированное за интервал времени с 23:20 до 23:30 UT 27 мая 2017 года на УКВ-радаре в районе Красноярска.

координаты точек отражения и нанесены на карту. Как видно из рис. 2, экваториальная граница радиоавроры равна $\sim 66.5^\circ$, а полюсная — $\sim 68^\circ$. Широтная протяженность радиоавроры объясняется геометрией ее наблюдения радаром: обратное рассеяние радиоволн от неоднородностей E-слоя ионосферы происходит в диапазоне высот 90–130 км. Долготная протяженность радиоавроры определяется двумя факторами — азимутальным сканированием радара в диапазоне $\sim 100^\circ$ и изменением ракурсных углов от 3° до $\sim 15^\circ$ в зависимости от азимута. С увеличением ракурсного угла уменьшается энергия сигнала, рассеянного от МОН [30], с 5 до 15 дБ на градус. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и, соответственно, вероятности обнаружения радиоавроры.

На рис. 3 показаны географическое расположение трех GPS-станций (анализ данных которых будет представлен ниже) и проекция пролета спутника Swarm A (высота орбиты — 465 км) над рассматриваемым регионом около 00 UT 28 мая 2017 г. Справа на рис. 3 показано сравнение вариаций электронной концентрации вдоль пролета спутника Swarm A в день бури 28 мая 2017 г. и в спокойный день 26 мая 2017 г. В спокойный день ионосферные неоднородности слабой интенсивности наблюдались в основном южнее 75° – 80° с.ш. В возмущенный день 28 мая 2018 аналогичный пролет спутника, соответствующий ~ 07 LT (0 UT), зарегистрировал расширение зоны ионосферных неоднородностей до 60° с.ш. Следует отметить, что

в возмущенных условиях, в отличие от спокойных, на этом пролете четко проявляется главный ионосферный провал (ГИП) на широте $\sim 73^\circ$ с.ш. При этом географическая широта минимума ГИП находится чуть севернее границы радиоавроры, показанной на рис. 2. Это говорит о том, что экваториальная стенка ГИП частично формируется за счет высыпаний авроральных электронов, ответственных за формирование неоднородностей на высотах нижней ионосферы, приводящих к радиоавроре. Граница неоднородностей на высотах пролета спутника Swarm A приблизительно совпадает с границами радиоавроры.

На рис. 4 показаны измерения концентрации электронов (а) и дрейфовые скорости ионов (б), полученные на спутнике DMSP F16 на высоте около 800 км, который пролетал над областью отражения радиосигналов радара. Можно отметить, что в поведении концентрации электронов на высотах внешней ионосферы как при пролете Swarm A, так и при пролете DMSP F16 наблюдаются флуктуации концентрации плазмы, связанные с ионосферными неоднородностями выше F2-слоя. В отличие от экваториальной границы радиоотражений, область этих неоднородностей начинается с $\sim 61^\circ$ с.ш., поэтому причина их возникновения не имеет прямой связи с радиоавророй. Таким образом, широтная протяженность регистрируемых неоднородностей отличается от протяженности неоднородностей на высотах E-области ионосферы. Видно характерное различие в скорости дрейфа ионов экваториальнее и южнее границы радиоав-

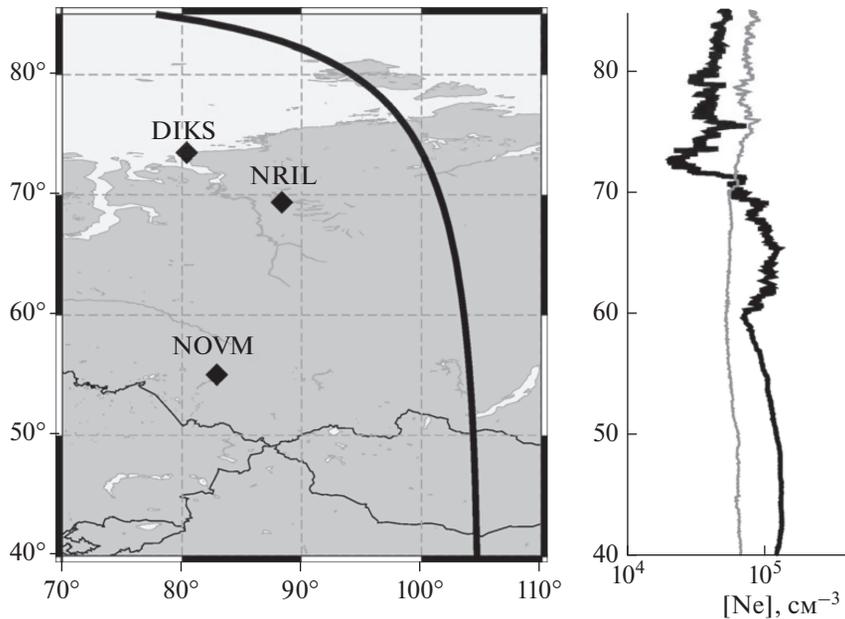


Рис. 3. Левая панель — географическая карта с расположением трех GPS-станций NOVМ, NRIL и DIKS и проекцией траектории полета спутника Swarm А (черная жирная линия) для 28 мая 2017 г. в период 0.14–0.35 UT. Правая панель — широтный профиль вариации электронной концентрации вдоль траектории полета спутника Swarm А в день бури 28 мая 2017 года (черная толстая линия) и в спокойный день 26 мая 2017 года (серая тонкая линия).

роры, в особенности в скорости горизонтального дрейфа. На более высоких широтах преобладает сильная конвекция плазмы, которая вызвана сильными электрическими полями в авроральной зоне.

На спектрограммах рис. 5 представлены измерения дифференциальных потоков электронов и ионов H^+ спутником DMSP F16. Из сравнения широтных границ радиоавроры (рис. 2) с границами авроральных высыпаний, так же как и с измерениями концентрации электронов и скорости дрейфа ионов (рис. 4), очевидна связь этих процессов. Из измерений видно, что основные высыпания энергичных частиц приходятся на зону до пересечения спутником области радиоотражений. Радиоаврора соответствует области высыпаний частиц с энергией 100–1000 эВ вблизи 66.5° с.ш. Границы радиоавроры находятся немного полярнее экваториальной границы авроральных высыпаний. Из вышеприведенного следует, что отражения радиоволн происходят на неоднородностях в нижней ионосфере, вызванных структурированными высыпаниями в области восходящего тока.

3.2. Временное развитие возмущений

На рис. 6 представлена зависимость радиоэха УКВ-радар в координатах “Время–Высота” в азимутальном секторе $\sim 100^\circ$. Вертикальными линиями выделены три случая: 1) спокойные геомагнитные условия в авроральной зоне и начальная фаза геомагнитной бури, которая привела к интен-

сивной радиоавроре (начало в $\sim 22:33$ UT 27 мая); 2) временной интервал длительностью ~ 1.5 ч (03:20–04:50 UT 28 мая), когда интенсивность радиоавроры резко уменьшилась; 3) временной интервал с эволюцией интенсивности радиоавроры от интенсивной до слабой в течение стадии восстановления геомагнитной бури. Для первого случая наблюдается резкий рост интенсивности радиоотражений в диапазоне высот от 100 до 130 км. Отражения во временной период 22:10–22:33 UT 27 мая соответствуют слабой радиоавроре и отражения от метеоров. Интенсивная радиоаврора имела продолжительность ~ 13 ч — до 10:55 UT 28 мая 2017 года. В целом, рассматриваемый интервал времени охватывает комплексную и длительную геомагнитную бурю, состоящую из нескольких суббуревых активизаций.

Явление спада интенсивности радиоавроры для второго случая (см. выше) в период 03:25–04:55 UT 28 мая 2017 года, вероятно, связано с уменьшением ионосферного электрического поля и сменой направления ионосферной конвекции [33]. Мы не обладаем непрерывным набором данных прямых измерений ионосферного электрического поля в рассматриваемом регионе, однако ниже будет представлен анализ временного распределения продольного тока для рассматриваемой бури по данным AMPERE.

На рис. 7 представлены вариации ROT для трех наземных GPS-станций, указанных на карте рис. 3, и всех наблюдаемых GPS-спутников в те-

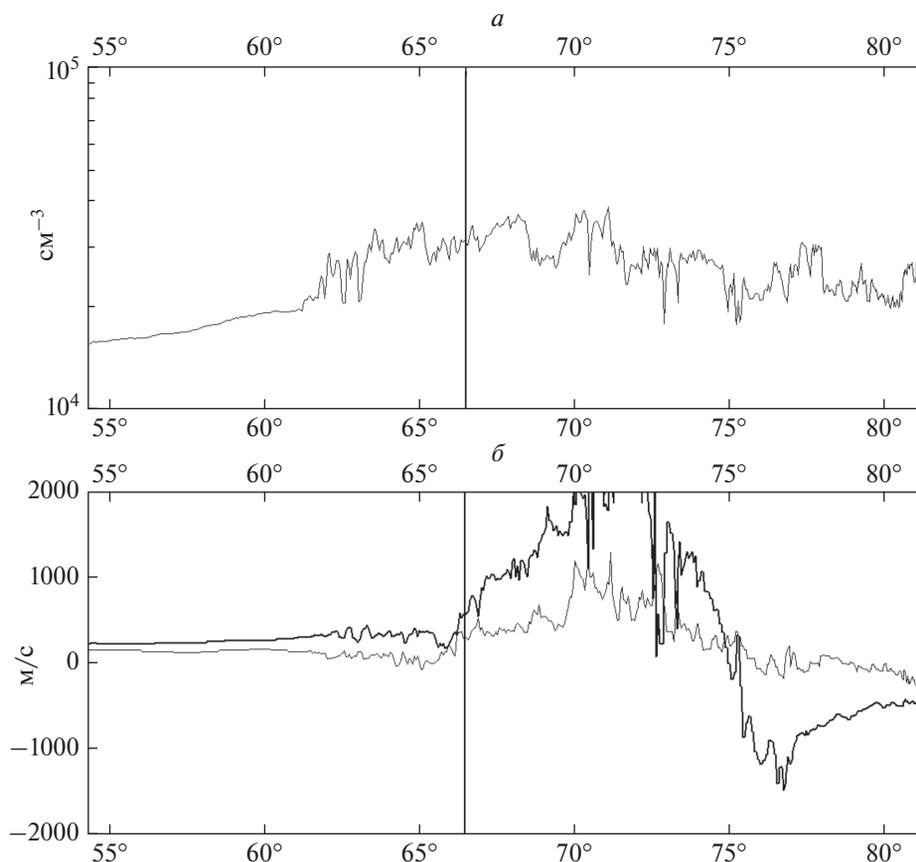


Рис. 4. Измерения концентрации электронов (*a*) и скорости дрейфа ионов (*б*), полученные при пролете спутника DMSP F16 27 мая 2017 г в период времени с 23:13 до 23:23 UT. По горизонтали отложена географическая широта положения спутника, по вертикали – концентрация (*a*) и скорость (*б*). Вертикальной чертой (~66.5° с.ш.) обозначена широта экваториальной границы радиоавроры. На рис. 4б жирной черной линией показан горизонтальный дрейф, тонкой серой линией – вертикальный дрейф скорости ионов.

чение двух дней 27–28 мая 2017 г. Спутники регистрировались в радиусе ~7°–10° относительно положения станции в горизонтальном масштабе. Необходимо отметить, что в нормальных (невозмущенных) условиях для среднеширотных станций ROT обычно варьируется около нулевых значений, в пределах ± 1 TECU/мин. На рис. 7 такая вариация ROT выглядит как горизонтальная линия с очень небольшими флуктуациями в течение всего периода наблюдения спутника (несколько часов). Как видно из рис. 7, до начала бури 27 мая 2017 г. на всех трех станциях наблюдается именно такое поведение индекса ROT. После начала возмущения наблюдалось значительное усиление флуктуаций значений ROT, превышающих 3–5 TECU/мин, что соответствует интенсивным ионосферным неоднородностям. Усиление фазовых флуктуаций раньше всего (~16 UT 27 мая) было зафиксировано на более высокоширотной станции DIKS. На станции NRIL такие флуктуации были зарегистрированы после ~18–20 UT 27 мая и носили менее выраженный характер. С усилением авроральной активности

($A_E > 1000$ нТл) после ~22 UT 27 мая на высокоширотных станциях DIKS и NRIL регистрируется значительное усиление ($ROT > \pm 5$ TECU/мин) фазовых флуктуаций навигационных сигналов для всех видимых спутников. С дальнейшим развитием бури (~00–03 UT 28 мая) над станцией NRIL наблюдаются более интенсивные ионосферные неоднородности, чем для более высокоширотной станции DIKS, что связано с расширением и смещением овала авроральных неоднородностей к более низким широтам. Однако для среднеширотной станции NOVМ вариации индекса ROT имели весьма спокойный характер как до, так и после начала бури. Последнее свидетельствует о том, что ионосферные неоднородности аврорального происхождения не достигли уровня в 55° с.ш. с развитием данной бури.

На рис. 8 показаны примеры ионограмм по данным станции вертикального зондирования ионосферы в Норильске. Анализ последовательности ионограмм 27-го и 28-го мая показал, что: 1) четкие следы от E- и F2-слоев (а в дневное вре-

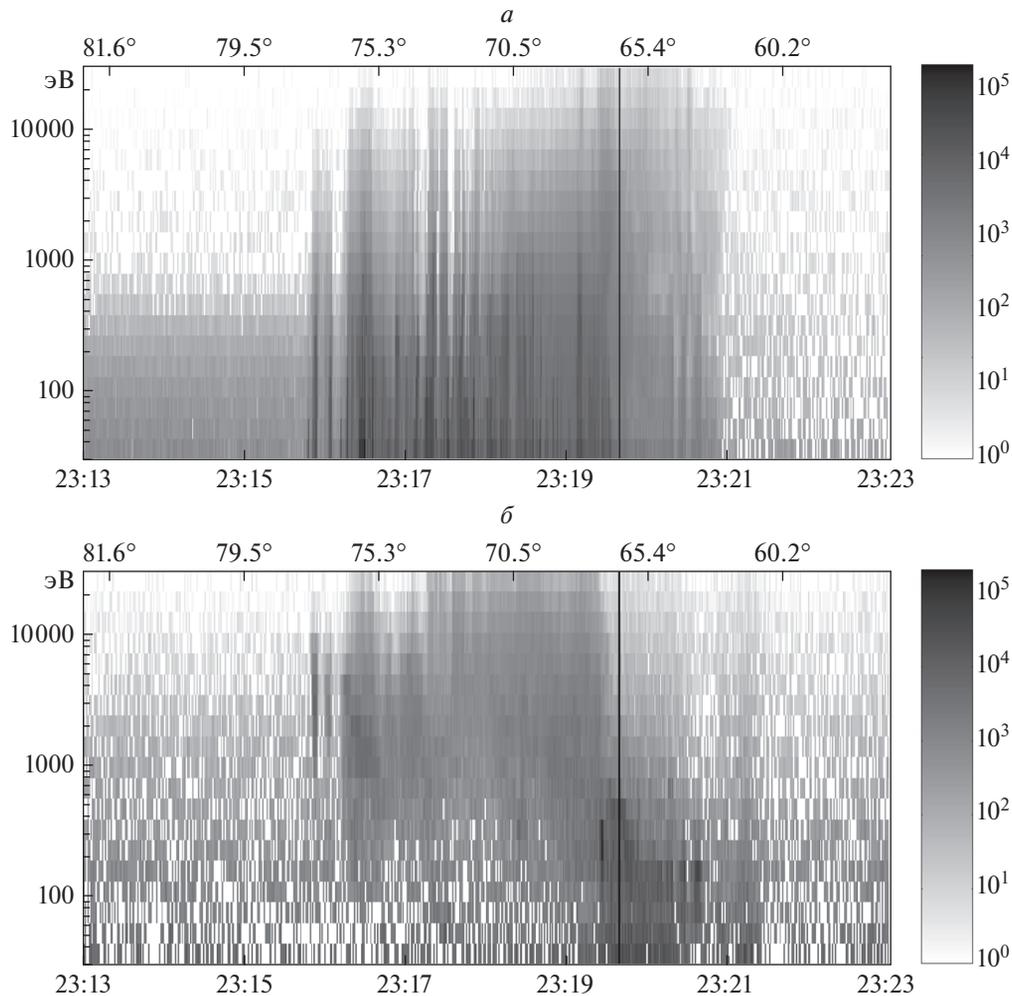


Рис. 5. Измерения высыпаний электронов (*a*) и ионов (*б*), полученные на спутнике DMSP F16 27 мая 2017 г. Нижняя горизонтальная ось показывает время UT, на верхней горизонтальной оси отложена географическая широта положения спутника в данный момент времени. Вертикальная ось показывает энергию частиц в эВ. Черно-белой заливкой показана интенсивность дифференциального потока высокоэнергичных частиц (частица/(эВ · с · см²)). Вертикальной черной линией показана широта экваториальной границы радиоавроры.

мя – и от F1-слоя) видны 27 мая вплоть до 16:00 UT; 2) с 16:00 до 17:15 UT развивается E-слой; 3) с 17:45 до 20:00 UT ионограммы над Норильском очень изменчивы: полное поглощение сменяется сильным F-рассеянием (рис. 8*a*); 4) с 20:15 до 21:00 UT ионограммы указывают на развитие неоднородного спорадического E-слоя над Норильском (рис. 8*б*); 5) с 21:30 UT до 01:30 UT 28 мая информация на ионограммах практически отсутствует (в это время на ионограммах лишь в отдельные моменты времени можно увидеть часть следа от E-слоя); 6) с 01:30 до 03:00 UT 28 мая на ионограммах появляются отчетливые следы от спорадического слоя E (рис. 8*в*); 7) с 03:30 до 12:00 UT 28 мая информация на ионограммах практически отсутствует (в это время на ионограммах лишь в отдельные моменты времени можно увидеть часть следа от E-слоя). Отсутствие информации на ионограммах в конце

27 мая и половине суток 28 мая может быть обусловлено полным поглощением сигнала на высотах нижней ионосферы и значительным уменьшением концентрации в F-области над Норильском. Оба явления могут быть объяснены тем, что Норильск в это время находился в области авроральных и более жестких высыпаний энергичных частиц. Именно за счет уменьшения электронной концентрации в F-области даже в отсутствие регистрации ионосферных неоднородностей по данным радара с 03:30 до 04:50 UT 28 мая ионограммы не указывают на наличие следов от ионосферных слоев.

Далее для исследования причин возникновения ионосферных неоднородностей в рассматриваемом регионе нами были использованы спутниковые и наземные данные вариаций магнитного поля и проведено их сравнение для спокойных

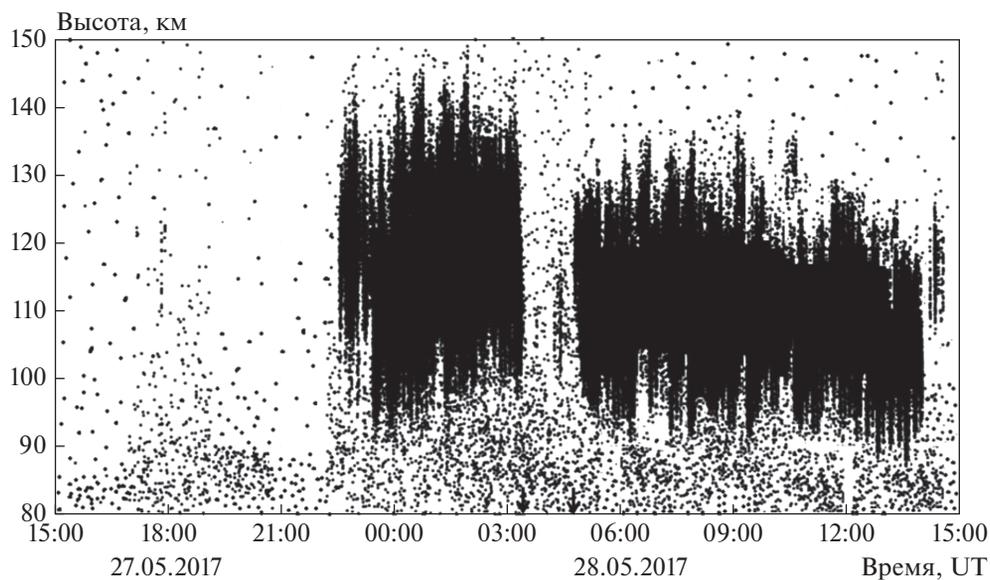


Рис. 6. Зависимость радиоэха по данным УКВ-радар в координатах “Высота–Время” за период 27–28 мая 2017 года. Черными точками показаны радиоэхо, зарегистрированные в уникальные моменты времени.

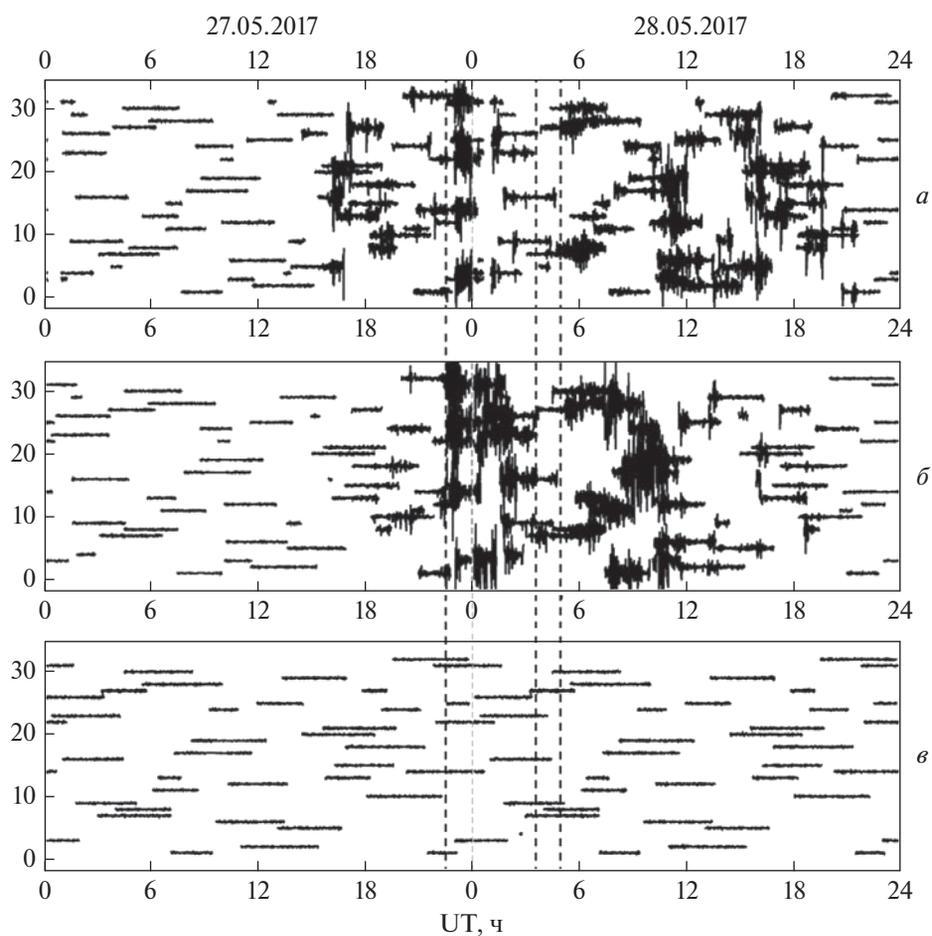


Рис. 7. Вариации индекса ROT для наземных GPS-станций DIKS (*a*), NRIL (*б*) и NOVМ (*в*) и всех наблюдаемых GPS-спутников в течение двух дней 27–28 мая 2017 г. На каждой панели вертикальная ось обозначает номер наблюдаемого GPS-спутника от 1 до 32; вертикальные черные штриховые линии соответствуют моментам времени 22:34, 03:23 и 04:54 UT.

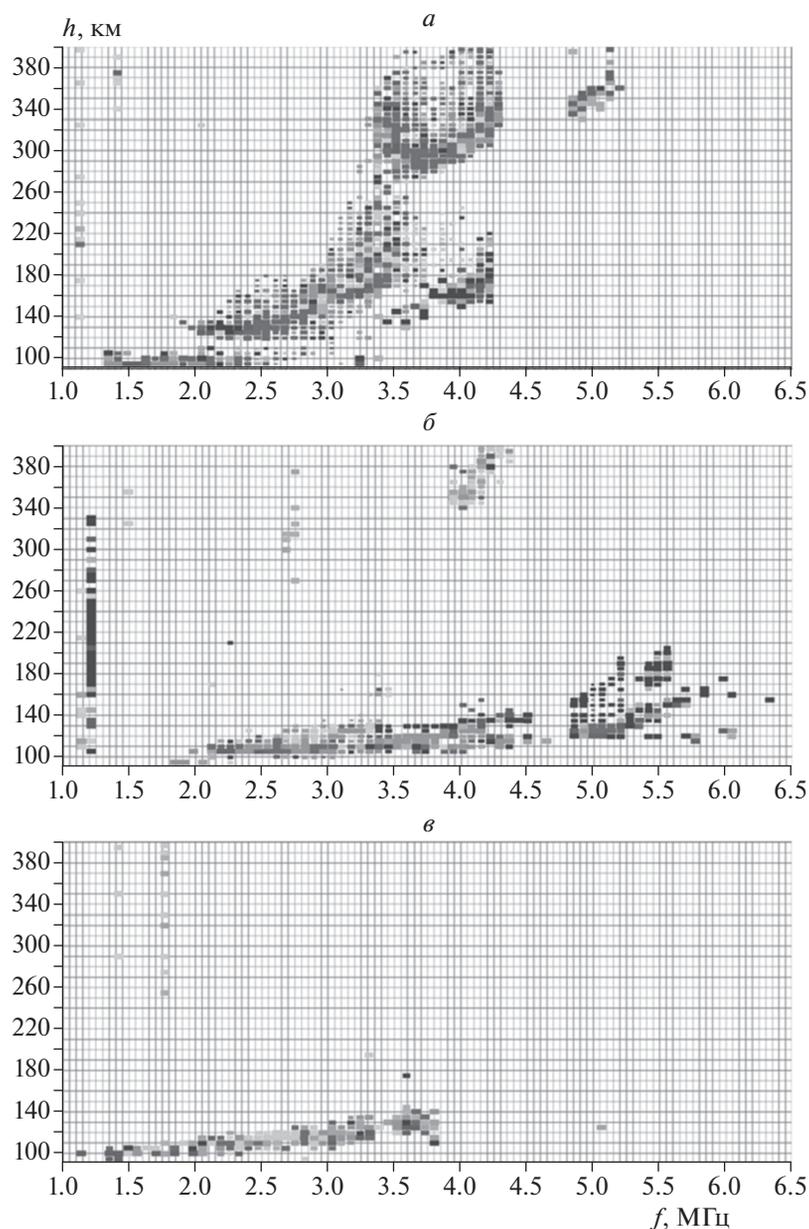


Рис. 8. Ионограммы вертикального зондирования над Норильском для 19:00 UT 27 мая (а); 20:45 UT 27 мая (б); 02:45 UT 28 мая 2017 года (е).

и возмущенных условий. Мы проанализировали изменения вертикальной компоненты dZ геомагнитного поля в Норильске (рис. 9). На станции наблюдаются отрицательные вариации dZ с ~16:00 UT 27 мая, что соответствует сжатию магнитосферы (рис. 9а). Сжатие привело к увеличению компоненты Z , которая была направлена вниз в северном полушарии (отрицательная компонента Z). Следовательно, увеличение отрицательного значения компоненты Z привело к увеличению отрицательного dZ . С 22:00 до 24:00 UT наблюдались сильные вариации dZ . Они были созданы высокоширотным западным электроджетом. С

22:13 до 23:12 UT на магнитометре наблюдалось значительное возрастание dZ до величины в несколько сотен нТл. С 23:13 до 24:00 UT 27 мая наблюдались сильные отрицательные вариации dZ со значениями до 300 нТл. Эти изменения в магнитном поле были вызваны смещением западного электроджета с высоких широт через Норильск к экватору. С 00:00 до ~ 02:30 UT 28 мая (рис. 9б) наблюдались значительные вариации положительного значения dZ с амплитудой ~500 нТл. Эти изменения были связаны с сильным авроральным электроджетом и интенсивной авроральной активностью над Норильском. Другой временной

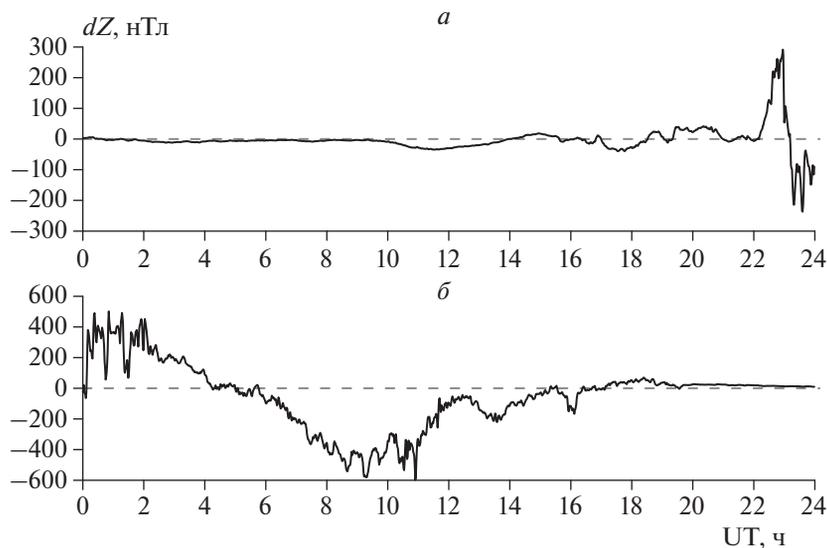


Рис. 9. Отклонения вертикальной магнитной компоненты dZ во время геомагнитной бури 27 (а) и 28 мая 2017 года (б), полученные по данным магнитометра в Норильске.

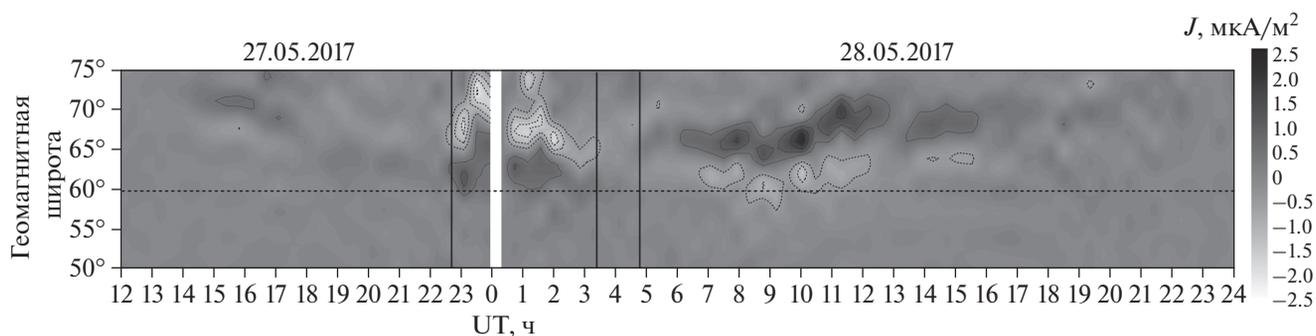


Рис. 10. Карта временного распределения радиальной плотности тока, полученной на фиксированной геомагнитной долготе Норильска в интервале геомагнитных широт от 50° до 75° . Штриховой горизонтальной линией отмечено положение Норильска на геомагнитной широте 59.9° . Вытекающие из ионосферы токи, показаны черным цветом (положительные значения) и сплошными изолиниями, а токи, втекающие в ионосферу, — белым цветом (отрицательные значения) и точечными изолиниями. Вертикальным линиям соответствуют моменты времени появления и исчезновения радарных отражений согласно рис. 6.

интервал сильных вариаций отрицательных значений dZ с амплитудой до 600 нТл наблюдался в период с $\sim 08:30$ до $\sim 11:00$ UT 28 мая. Этот интервал соответствовал смещению западного электроджета к экватору и интенсивной авроральной активности южнее Норильска.

Проведем сопоставление времен регистрации неоднородностей на различных инструментах с пространственно-временными изменениями продольных токов второй зоны, полученных в рамках эксперимента AMPERE на геомагнитной долготе Норильска. Данные радиальной плотности тока, представленные на рис. 10, вычислены в исправленных геомагнитных координатах.

В спокойных геомагнитных условиях граница расположения продольных токов первой и вто-

рой зон находится вблизи геомагнитной широты $65^\circ-75^\circ$. Из рис. 10 видно, что во время бури наблюдается как усиление токов, так и смещение в сторону экватора (на $\sim 10^\circ$ по широте) области протекания продольных токов. Во время рассматриваемого события происходит смещение границы токов второй зоны вплоть до широты Норильска. Временной интервал смещения области продольных токов хорошо согласуется со временем наблюдения радиоавроры на радаре (рис. 6) с 22:30 UT 27 мая до 14:00 UT 28 мая. Появление интенсивных радиоэхо в 22:35 UT 27 мая соответствует максимальным значениям плотности вытекающего и втекающего тока второй и первой зон соответственно (до 2 мкА/м^2 по модулю). Области интенсивных высыпаний высокоэнергичных электронов (сияний) пространственно сов-

падают с областями продольного тока, вытекающего из ионосферы [34]. Сравнение рис. 7 и 10 указывает на связь значительных изменений ($ROT > \pm 5$ TECU/мин) фазовых флуктуаций навигационных сигналов над Норильском и Дикси с усилением и смещением продольных токов второй зоны. Причем на Дикси флуктуации фазы начинают наблюдаться с 16–17 UT 27 мая. Из рис. 10 видно, что на геомагнитной широте Дикси ($\sim 65^\circ$) в указанное время 27 мая наблюдаются довольно значительные величины втекающих токов второй зоны (-0.5 мкА/м²). В период с 3:20 до 4:50 UT 28 мая по данным радара (рис. 6) и приемника ГНСС в Норильске (рис. 7) наблюдается снижение интенсивности как радиоаворы, так и вариаций ROT. Такое ослабление, по-видимому, связано с процессами смены знака продольных токов второй и первой зон и соответствующим ослаблением этих токов. Можно отметить, что после смены знака токов второй зоны изменилась средняя высота отражений радиоаворы: она уменьшилась приблизительно на 10 км. Наличие интенсивных фазовых флуктуаций с 05:00 до 11:00 UT 28 мая над Норильском связаны с расположением границы продольных токов второй зоны вблизи приемника GPS-сигналов. В рассматриваемый период на ионозонде в Норильске отсутствуют ионограммы из-за сильного поглощения излучаемого сигнала в среде. Сравнение с результатами наблюдения концентрации электронов по Swarm A показало, что спад концентрации между 73° – 75° географической широты (63° – 65° геомагнитной) в указанный момент времени (0:14–0:35 UT) может быть связан с пролетом спутником области продольных токов второй зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоширотная ионосфера является сильно структурированной средой из-за наличия большого количества неоднородностей различных масштабов, возникающих вследствие сложных процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия. В периоды геомагнитных возмущений происходит формирование наиболее сильных неоднородностей и нестационарностей плазмы. В данной работе представлен мультиинструментальный обзор пространственно-временной динамики ионосферных неоднородностей различного масштаба в восточно-сибирском регионе во время геомагнитной бури 27–28 мая 2017 года.

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом. Крупномасштабные неоднородности размером ~ 10 – 100 км и связанные с ними вариации ПЭС были зарегистрированы GPS-приемниками в Норильске и Дикси, в то время как приемник в Новосибирске не зарегистрировал заметных изменений ROT во время рассматриваемой бури. Мелкомасштабные

неоднородности в E-слое с продольным размером порядка 35 см были зарегистрированы УКВ-радаром в районе Норильска. Ионозонд в Норильске также зарегистрировал формирование интенсивных неоднородностей в E-слое и значительный временной интервал с полным поглощением КВ-радиоволн. Последнее указывает на то, что Норильск находился внутри аврорального овала в рассматриваемый период времени.

Мы выявили согласие между появлением интенсивной радиоаворы и ростом ROT на высокоширотной и авроральной станциях во время геомагнитной бури. Время возникновения ионосферных неоднородностей и их регистрация согласуются с пространственно-временными изменениями продольных токов второй зоны. В областях формирования ионосферных неоднородностей наблюдаются сильные электрические поля и увеличенные дрейфы ионов. Период снижения интенсивности радиоаворы (03:20–04:50 UT 28.05.2017) согласуется со временем смены знака продольных токов.

Авторы благодарят Европейское Космическое Агентство (European Space Agency) за предоставление данных миссии Swarm (<http://earth.esa.int/swarm>), National Geophysical Data Center (NGDC NOAA) за данные DMSP (satdat.ngdc.noaa.gov/dmsp/data), а также International GNSS Service (IGS) за GPS-данные наземных станций (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/>). Также авторы выражают признательность ИПГ и лично Алпатову В.В. за предоставленные данные приемников GPS/ГЛОНАСС. Данные космической погоды были предоставлены NASA/GSFC's Space Physics Data Facility's OMNIWeb service (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Авторы выражают благодарность Дж. Коксону за предоставление данных AMPERE по продольным токам.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-77-20009). Анализ и обработка данных ионозонда и магнитометра в Норильске выполнены при финансовой поддержке Российско-Тайваньским проектом MOST-107-2923-M-008-001-MY3/18-55-52006MHT_a (Ратовский К.Г., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Рахматулин Р.А.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keskinen M.J., Ossakow S.L.* // Radio Sci. 1983. V. 18. № 6. P. 1077; <https://doi.org/10.1029/RS018i006p01077>
2. *Розанов Е.В.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 8. С. 73; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070154>
3. *Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С.* Физические процессы в полярной ионосфере. М.: Наука, 1988.
4. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988

5. *Hultqvist B., Oieroset M., Paschmann G. et al.* // Space Sci. Ser. ISSI. 1999. V. 6. № 7.
6. *Hunsucker R.D., Hargreaves J.K.* The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation. Cambridge University Press, 2002.
7. *Schunk R.W., Nagy A.F.* Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge University Press, 2009. P. 268.
8. *Багаряцкий Б.А.* // УФН. 1961. Т. 63. С. 197.
9. *Leadabrand R.L., Schlobohm J.C., Baron M.J.* // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 17. P. 4235; <https://doi.org/10.1029/JZ070i017p04235>
10. *Leadabrand R.L., Larson A.G., Hodges J.C.* // Ibid. 1967. V. 72. № 15. P. 3877.
11. *Aarons J.* // Ibid. 1997. V. 102. № A8. P. 17219; <https://doi.org/10.1029/97JA01118>
12. *Чернышов А.А., Ильясов А.А., Могилевский М.М. и др.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 3. С. 277.
13. *Луясов А.А., Чернышов А.А., Могилевский М.М. et al.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. № 3. 032906; <https://doi.org/10.1063/1.4916125>
14. *Ильясов А.А., Чернышов А.А., Могилевский М.М. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. №5. С. 37–42
15. *Чугунин Д.В., Клименко М.В., Чернышов А.А. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 1. С. 53; <https://doi.org/10.7868/S0016794018010054>
16. *Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В. и др.* // Хим. физика. 2018. 37. № 7. С. 87; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18070129>
17. *Basu S., MacKenzie E., Basu S. et al.* // Radio Sci. 1983. V. 18. P. 1151.
18. *Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A. et al.* // Space Weather. 2014. V. 12 № 7. P. 508; <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
19. *Aarons J., Lin B.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1999. V. 61. P. 309; [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00131-X)
20. *Mushini S.C., Jayachandran P.T., Langley R.B. et al.* // GPS Solutions. 2012. V. 16. P. 363; <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0238-4>
21. *Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Тумова М.А.* // Космич. исследования. 2016. Т. 54. № 1. С. 1; <https://doi.org/10.7868/S002342061601143>
22. *Yeh K.C., Liu C.H.* // IEEE Proc. 1982. V. 70. P. 324.
23. *Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J. et al.* // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. № 18. P. 2283.
24. *Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M.* // Ibid. 2002. V. 29. № 14; <https://doi.org/10.1029/2002GL014770>
25. *Reinking J.T., Knepp D.L., Hausman A.M.* // Radio Sci. 2001. V. 36. № 5. P. 1157; <https://doi.org/10.1029/1999RS002413>
26. *Knepp D.L.* // Ibid. 2011. V. 50. P. 1; <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6050974>
27. *Knepp D.L.* // Radio Sci. 2015. V. 50. P. 968; <https://doi.org/10.1002/2015RS005740>
28. *Watson C., Jayachandran P.T., Spanswick E. et al.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A00190; <https://doi.org/10.1029/2010JA015732>
29. *Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I.* // GPS Solutions. 2018. V. 22. P. 69; <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0730-1>
30. *Успенский М.В., Старков Г.В., Евласнин Л.С.* Полярные сияния и рассеяние радиоволн. Л.: Наука, 1987. С. 237.
31. *Close S., Hunt S.M., McKeen F.M. et al.* // Radio Sci. 2002. V. 37 № 1; <https://doi.org/10.1029/2000RS002602>
32. *Milan S.E., Carter J.A., Korth H. et al.* // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. P. 10, 415; <https://doi.org/10.1002/2015JA021680>
33. *Uspensky M.V., Janhunen P., Koustov A.V. et al.* // Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 1081; <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1081-2011>
34. *Waters C.L., Anderson B.J., Liou K.* // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 11. P. 2165; <https://doi.org/10.1029/2000GL012725>