УДК 550.388.2

ОТКЛИК ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ВИХРИ

© 2019 г. В. Е. Пронин^{1,} *, В. А. Пилипенко², В. И. Захаров¹, Д. Л. Мюрр³, В. А. Мартинес-Беденко²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия ²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия ³Центр атмосферной и космической физики, Университет Аугсбург, Миннеаполис, США *tolgamrab@yandex.ru Поступила в редакцию 04.08.2017 г. После доработки 12.02.2018 г. Принята к публикации 30.03.2018 г.

В работе рассматривается отклик полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы Земли на импульсные геомагнитные возмущения – конвективные вихри (Travelling Convection Vortices). Для выделения *TCV* использовались данные сетей наземных магнитометров в Арктической Канаде и Гренландии, вариации ПЭС получены при обработке данных приемных станций IGS и UNAVCO глобальной навигационной спутниковой системы GPS. Обнаружены ионосферные возмущения связанные с *TCV*. Использование сети станций позволяет оценить динамику появления и скорость распространения возмущения в пространстве.

DOI: 10.1134/S0023420619020079

ВВЕДЕНИЕ

Исследования состояния околоземной среды, кратко именуемое "космическая погода", выходят за рамки чисто академического интереса по мере возрастания количества проблем, связанных с нарушениями нормального функционирования наземных и спутниковых технологических систем. Особую важность приобретают помехи сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GLONASS и GPS при сильных возмущениях космической погоды (солнечные вспышки, магнитные бури и суббури [1], высыпания частиц [2] и т.п.), что сказывается на качестве навигационных функций. При этом, чем шире внедряются космические технологии, тем чувствительнее для экономики и жизнедеятельности становятся их сбои и выходы из строя. Изменчивость факторов космической погоды и их воздействие на околоземную среду являются естественной нормой, их невозможно избежать, но необходимо изучать и учитывать для успешного функционирования навигационных систем. Ионосфера является внутренней границей околоземного пространства, где энергия магнитосферной плазмы переносится в атмосферу. Хотя значительный объем информации о свойствах взаимодействия между магнитосферой, ионосферой, и атмосферой может быть получен с помощью наземных магнитометров и околоземных спутников, особенности переноса энергии через ионосферу остаются закрытыми для непосредственного наблюдения. В настоящее время ионосферные проявления магнитосферных и атмосферных возмущений могут быть зафиксированы с помощью все более широко развивающихся глобальных спутниковых навигационных систем (GPS, GLONASS, и др.) [3, 4]. В качестве побочного продукта, эти системы дают информацию о вариациях интегрального ионосферного параметра (вдоль радиолуча) - полного электронного содержания ПЭС (т.н. Total Electron Content). ПЭС наблюдения оказались достаточно чувствительными, чтобы обнаруживать акустические и внутренние гравитационные волны от землетрясений [5, 6], цунами [7], тайфунов [8], а также интенсивные магнитогидродинамические (МГД) волны в ионосфере [9]. Несмотря на определенные успехи, физический механизм возмущения ПЭС, связанный с магнитосферными возмущениями, остается не выясненным окончательно.

Взаимодействие между солнечным ветром и магнитосферой служит источником многообразных видов нестационарных процессов и возмущений разных пространственных и временных масштабов. При этом интенсивные возмущения могут наблюдаться не в период высокой магнитосферной активности (магнитные бури и суббури), а при спокойной геомагнитной обстановке. Такими импульсными возмущения являются специфичные для дневной высокоширотной ионосферы движущиеся конвективные вихри *TCV*, являющимися откликом на локальное воздействие на магнитосферу [10]. Наземным проявлением *TCV* являются уединенные магнитные импульсы *MIE* (magnetic impulse event) — спорадические возмущения геомагнитного поля длительностью ~5–10 мин и с амплитудами ~100 нТ [11].

Физический механизм и пространственная структура TCV не определены однозначно. Геомагнитные наблюдения могут детектировать только интегральный эффект магнитосферноионосферных токов, поэтому мелкомасштабные свойства ТСУ нельзя определить, исходя только из данных наземных магнитометров. В картине эквивалентных ионосферных токов TCV проявляется как двойной вихрь с характерными размерами до ~1000 км. Эти вихревые структуры образуются вокруг пары (восходящего и нисходящего) продольных токов между ионосферой и магнитосферой [12, 13]. Пространственная локальность этого возмущения приводит к тому, что оно проявляется не только в горизонтальной (X), но и вертикальной (Z) компоненте магнитного поля. Обычно *TCV* распространяются по долготе в анти-солнечном направлении со скоростью ~5-10 км/с [14]. Эта скорость соответствует ионосферной проекции скорости обтекания флангов магнитосферы потоком солнечной плазмы. Картина азимутального распространения ТСУ подобна движению пузыря в текущей кипящей жидкости: возникшее возмущение нарастает по мере движения, а затем спадает. Наблюдаемая форма возмущения в фиксированной точке наблюдения определяется как его распространением, так и нарастанием/спаданием во времени.

Активное исследование этих возмущений стимулировалось предположением о том, что они являются наземным проявлением импульсного пересоединения межпланетного и магнитосферного магнитных полей на дневной магнитопаузе [15]. Возможным источником ТСУ могут быть импульсные вариации динамического давления солнечного ветра [16, 17]. Спорадически возникаюшие локальные области горячей плазмы в переходном слое магнитосферы (hot flow anomalies) также могут быть источником TCV [18]. TCV могут проявляться не только в виде уединенных импульсов, но и в виде квазипериодической последовательности возмущений. Сопровождающее генерацию *TCV* интенсивное магнитное возмущение в магнитосфере может вызывать высыпание энергичных магнитосферных электронов [19, 20]. Многие важные характеристики *TCV* все еще не были должным образом изучены и интерпретированы.

В этой работе мы покажем, что импульсные уединенные геомагнитные возмущения типа *TCV/MIE* также могут быть зарегистрированы с

помощью сети GPS-приемников. Одновременный анализ данных наземных магнитометров и ПЭС вариаций позволяет получить новую информацию о взаимосвязи между импульсными геомагнитными и ионосферными возмущениями.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использовались данные магнитометров различных наземных сетей – CARISMA, CANMOS, Greenland Coastal Array, и MACCS с временным разрешением 1 с. Карта с положением выбранных станций приведена на рис. 1, координаты станций даны в табл. 1. С учетом топологии используемых сетей были сформированы меридиональный и два долготных профиля. Меридиональный профиль станций вдоль геомагнитной долготы $\Lambda \sim 40^{\circ}$ (Гренландия) включает в себя станции KUV-UPN-UMQ-GDH-STF-SKT-GHB-FHB-NAQ. Долготные профили составлены из станций вдоль геомагнитной доль геомагнитной широты $\Phi \sim 75^{\circ}$: BLC-CDR-PGG-GDH, и вдоль широты 72° : RAN-IQA-STF-SCO.

Возмушения в ионосфере рассматривались в виде вариаций ПЭС, полученных при обработке данных приемников сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS, входящих в сети IGS и UNAVCO. Мы располагали данными с 30-с разрешением 11 станций-приемников GPS (рис. 1) для получения информации о состоянии ионосферы (координаты приемников даны в таблице). Вычисление ПЭС вдоль радиотрассы спутник - приемник производилось по известному методу с использованием данных двух-частотных фазовых измерений [3]. Наклонное ПЭС вдоль радиолуча спутник – приемник пересчитывалось в вертикальный ПЭС в подъионосферной точке (пересечение радиолуча с ионосферным максимумом на высоте 300 км). Абсолютные значения ПЭС не рассчитывались и не использовались в работе. Во время анализированных относительно коротких временных интервалов нефизических скачков фазы (cycle slips) не отмечено. Данные GPS ограничивались по углу возвышения (угол между поверхностью Земли и направлением радиолуча на спутник) α > 5°. Вариации ПЭС представлены в единицах TECu (1 TECu = 10^{16} частиц/см²). Трек. соответствующий GPS спутнику с PRN номером XX и приемнику YYYY обозначаются как ХХҮҮҮҮ.

Рассмотрим результаты совместного анализа магнитометрических и ионосферных данных на примере события 15.I.2011.

ГЕОМАГНИТНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ

Уединенный магнитный импульс типа *TCV* наблюдался 15.I.2011 около 10.45 UT (рис. 2). Возбуждение этого импульса не связано с какими-либо



Рис. 1. Карта магнитных станций сетей CARISMA, MACCS, и Greenland Coastal Array (черные кружки), и GPS-приемников (ромбы), данные которых использованы в работе. Сетка геомагнитных координат показана сплошными линиями, географических – пунктирными.

сильными возмущениями в межпланетной среде: согласно базе данных OMNI скорость солнечного ветра $V \sim 470$ км/с, его давление $P \sim 1.4$ нПа и плотность $N \sim 3$ см⁻³ были стабильны, лишь магнитное поле в 10.40 UT несколько изменило ориентацию – Bz резко упало от 0 до –2 нТл. Высокоширотные геомагнитные индексы AL, AU имеют в период времени 10–12 UT амплитуды менее 20 нT, т.е. показывают практическое отсутствие магнитной возмущенности.

В этот момент Гренландский профиль вдоль геомагнитной долготы 40° находился в утреннем секторе (~09 LT). Наибольшее по величине возмущение ~200 нTл с длительностью ~12 мин на-

Таблица 1

| Магнитные станции | | | | | | | GPS-приемники | | |
|-------------------|-----|------------|--------|-------------|--------|-----------|---------------|-------|--------|
| Станция | Код | Geographic | | Geomagnetic | | Сеть | Станция | Geo | |
| | | Lat | Long | Lat | Long | CCIB | Станция | Lat | Long |
| Rankin Inlet | RAN | 62.80 | 267.67 | 73.7 | -029.0 | CARISMA | Bake | 64.32 | -96.00 |
| Pangnirtung | PGG | 66.10 | 294.20 | 75.2 | 020.1 | MACCS | Chur | 58.76 | -94.09 |
| Iqaluit | IQA | 63.75 | 291.47 | 72.1 | 014.5 | CANMOS | Halc | 68.77 | -81.26 |
| Cape Dorset | CDR | 64.20 | 283.40 | 74.6 | 001.2 | MACCS | Iqal | 63.76 | -68.51 |
| Baker Lake | BLC | 64.30 | 264.00 | 74.3 | 326.1 | CANMOS | Kaga | 69.22 | -49.82 |
| Kullorsuaq | KUV | 74.57 | 302.82 | 81.2 | 044.5 | Greenland | Kuuj | 55.28 | -77.75 |
| Upernavik | UPN | 72.78 | 303.85 | 79.5 | 042.0 | Greenland | Nain | 56.54 | -61.69 |
| Umanaq | UMQ | 70.68 | 307.87 | 76.9 | 043.9 | Greenland | Ponc | 72.69 | -77.96 |
| Godhavn | GDH | 69.25 | 306.47 | 75.8 | 040.4 | Greenland | Qiki | 67.56 | -64.03 |
| S. Stromfjord | STF | 67.02 | 309.28 | 73.2 | 041.7 | Greenland | Reso | 74.69 | -94.89 |
| Sukkertoppen | SKT | 65.42 | 307.10 | 72.0 | 038.0 | Greenland | Sch2 | 54.83 | -66.83 |
| Godthab | GHB | 64.17 | 308.27 | 70.6 | 038.5 | Greenland | | | |
| Frederikshab | FHB | 62.00 | 310.32 | 68.0 | 039.6 | Greenland | | | |
| Narsarsuaq | NAQ | 61.18 | 314.57 | 66.3 | 043.9 | Greenland | | | |
| Scoresbysund | SCO | 70.48 | 338.03 | 71.6 | 073.2 | Greenland | | | |



Рис. 2. Возмущение магнитного поля 15.1.2011, зафиксированное станциями Гренландского профиля KUV-UPN-UMQ-GDH-STF-SKT-GHB-FHB-NAQ: (слева) *Х*-компонента, (справа) *Z*-компонента.

блюдалось по *X*-компоненте на $\Phi \sim 75^{\circ}$ (GDH) (рис. 2, слева), и по *Z*-компоненте ~150 нТл с длительностью ~5 мин на $\Phi \sim 73^{\circ}$ (STF) (рис. 2, справа).

Данные азимутального профиля на $\Phi \sim 75^{\circ}$ показывают, что импульс распространялся с востока на запад (т.е. в анти-солнечном направлении). В процессе распространения импульс усилился от ~50 нТл на станции GDH до наибольшей величины ~200 нТл на станциях PGG и CDR, и затем ослабился до ~50 нТл на BLC.

Аналогичную картину можно видеть по магнитным данным профиля $\Phi \sim 73^{\circ}$ (рис. 3). Импульс *TCV* возник на восточном побережье Гренландии (SCO), достиг максимума своей амплитуды ~200 нТл на восточном побережье Канады (IQA), а затем ослабился до уровня фоновых флуктуаций при распространении до станции RAN.

Эффекты азимутального распространения наиболее четко видны между парами станций PGG-CDR и STF-IQA. Кросс-корреляционный анализ показал, что временной сдвиг магнитного сигнала по X-компоненте между станциями IQA-STF составляет $\Delta t = 200$ с (X-компонента) и $\Delta t = 150$ с (Z-компонента). Этот временной сдвиг между станциями, разнесенными по геомагнитной долготе на $\Delta \Lambda = 25.9^{\circ}$ и по расстоянию $\Delta x =$ = 740 км, соответствует угловой скорости $\Omega =$ = 0.13 град/с и азимутальной компоненте скорости V = 3.7 км/с, при максимуме коэффициента корреляции R = 0.75 по X-компоненте. Оценки по *Z*-компоненте дают $\Omega = 0.17$ град/с и *V* = 4.9 км/с при *R* = 0.76. Поскольку вариации *Z*-компоненты подвержены влиянию берегового эффекта, результаты полученные для этой компоненты менее надежны.

Кросс-корреляционный анализ для пары станций PGG–CDR с $\Delta\Lambda = 18.9^{\circ}$ и $\Delta x = 647$ км дал следующие значения: по *X*-компоненте R = 0.9, $\Delta t = 200$ с, $\Omega = 0.09$ град/с, V = 3.2 км/с; и по *Z*-компоненте R = 0.85, $\Delta t = 300$ с, $\Omega = 0.06$ град/с, V = 2.2 км/с.

На геомагнитной оболочке $\Phi \sim 72^{\circ}-73^{\circ}$ (IQA, STF) импульс вызвал затухающий квазипериодический ($T \sim 3-4$ мин) отклик в геомагнитном поле, преимущественно по *X*-компоненте (рис. 3).

ИОНОСФЕРНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ

В качестве первого шага изучена возможность автоматического определения характерного отклика на событие *TCV* в ионосферных данных. Были разработаны несколько алгоритмов, выделяющих изолированные флуктуации фиксированной длительности на заданном фоне. Верхняя граница, соответствующая сбою определялась как 6 TECu/min [21]. Появление возмущения определялось, как превышение фонового значения в полтора раза или (если фоновое значение слишком мало) — как превышение порога в 0.4 TECu. Пример типичной формы изолированной флуктуации



Рис. 3. Возмущение магнитного поля, зафиксированное станциями профиля ran-iqa-stf-sco вдоль 73° магнитной широты.

ПЭС (для трассы llqiki), выделенной с помощью автоматического алгоритма, показан на рис. 4. Созданное программное обеспечение позволяет рассмотреть множество временных рядов флуктуаций ПЭС, соответствующих различным парам спутник-приемник, с учетом координат подъионосферных точек. Таким образом были получены карты движения подъионосферных точек ("треки") с указанием времени и координат возмущения, представленные на рис. 6.

Анализ данных с приемников GPS с помощью описанного алгоритма выявил уединенные возмущения ПЭС (рис. 5). Эти возмущения сопровождаются скачком производной сигнала. Величина вариаций ПЭС составляла более 1 ТЕСи, производной – более 0.5 ТЕСи/тіп. Автоматически выделенные ионосферные возмущения оказались близки по времени и длительности (5–10 мин) к вариациям, наблюдаемым в магнитометрических данных.

По карте движения подыоносферных точек в интересующий нас период времени (рис. 6) были выделены профили по долготе и широте.

Меридиональный профиль возмущений ПЭС вдоль западного побережья Гренландии (рис. 7) показывает, что возмущения достигают амплитуд ~2 TECu (треки 22qiki, 19qiki) и локализованы по широте в пределах ~5°, что согласуется с локализацией вомущения в магнитных данных.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 57 № 2 2019

Наблюдаемое возмущение быстро затухает в ионосфере при распространении, отчетливые вариации видны только на двух восточных треках профиля $\Phi \sim 75^{\circ}$. Здесь так же наблюдается западное направление распространения, как и для магнитного возмущения. Корреляционный анализ треков 28qiki и 28kaga, дает временной сдвиг $\Delta t = 210$ с, при коэффициенте корреляции R = 0.61.



Рис. 4. Пример типичной формы изолированной флуктуации ПЭС, выделенной с помощью автоматического алгоритма (точки показывают определяемый автоматически центр возмущения).



Рис. 5. Пример автоматического выделения изолированных флуктуаций на карте с меткой времени, соответствующей центру флуктуации. Размер маркера пропорционален амплитуде возмущения.



Рис. 6. Карта подыоносферных треков, соответствующих по локализации выбранным профилям наземных магнетометров.



Рис. 7. Вариации ПЭС (удален тренд с периодами более 5 мин) соответствующие подыоносферным точкам, образующих профиль по широте (~40° восточной долготы) вдоль западного побережья Гренландии.

В предположении, что возмущение равномерно распространялось между центрами треков вдоль поверхности Земли, означает скорость V = 3 км/с.

Профиль ионосферных треков, соответствующий $\Phi \sim 72^{\circ}$ более удобен для рассмотрения (рис. 8). На этих широтах проявляется квазипериодические флуктуации ПЭС, соответствующие магнитным пульсациям, возбуждаемые импульсом *TCV*. Сопоставление возмущений на радиотрассах 11iqal и 19qiki отчетливо показывает западное распространение возмущения. Корреляционный анализ дает сдвиг $\Delta t = 210$ с при R = 0.70. В предположении, что возмущение распространялось между центрами треков, вдоль поверхности Земли, обнаруженный временной сдвиг соответствует скорости V = 4 км/с.

Таким образом, в ионосферных данных наблюдается картина распространения возмущения, аналогичная представленной в магнитных данных. Изолированные флуктуации ПЭС длительностью ~10 мин распространяются на запад со скоростями ~3–4 км/с.

Сопоставление волновых форм геомагнитных и ионосферных вариаций на близких магнитных и GPS станциях возможно на парах *STF*-19qiki и *IQA*-17iqal. На этих широтах импульс *TCV* сопровождался всплеском периодических колебаний (рис. 9). Для более строгого обоснования когерентности ионосферных и геомагнитных сигналов и их фазовых соотношений, был применен кросс-

спектральный анализ, подтвердивший визуальные впечатления. Для этих пар магнитных и GPS станций кросс-спектральный анализ дает величину спектральной когерентности между магнитными и ионосферными возмущениями $\gamma(f) \sim 0.55-0.75$ (в зависимости от компоненты) вблизи характерных частот возмущений 5–6 мГц (не показано). Фазовые сдвиги между магнитным и ионосферными возмущениями гореднее значение в частотной области вблизи максимума когерентности составляет $\Delta \phi \sim 75^\circ$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе показана возможность выделения возмущений ПЭС, вызванных конвективными ионосферными вихрями *TCV* на высоких широтах. Нами рассмотрено событие 2011-01-15, когда были совместно проанализированы данные наземных магнитометров и данные о возмущениях ПЭС.

Наземный магнитный импульс TCV с длительностью ~10 мин и амплитудой ~100 нТл был зарегистрирован в предполуденные часы на сети станций западного побережья Гренландии и Северной Канады. В азимутальном направлении импульс распространялся со скоростью 3.2–3.7 км/с в западном направлении (рис. 2, 3). В меридиональной пространственной структуре магнитного импульса TCV виден временной сдвиг (рис. 2), соот-



Рис. 8. Вариации ПЭС соответствующие подыоносферным точкам 19kaga-19qiki-11iqal-17iqal, образующих профиль по долготе на широте 72°.

ветствующий кажущейся фазовой скорости направленной к полюсу. Этот сдвиг, по-видимому, обусловлен тем, что возмущение от экваториальной плоскости магнитосферы переносится к ионосфере нестационарным продольным током, и на более высоких широтах с более длинными силовыми линиями этот процесс занимает больше времени, чем на более низких широтах. Пространственная локализация *TCV* указывает на то, что это геомагнитное возмущение создается альвеновской МГД модой.

В ионосферных данных с помощью созданного алгоритма был зафиксирован отклик на *TCV*, проявляющийся также в виде уединенного импульса ПЭС с длительностью ~10 мин и амплитудой до 2 TECu. В вариациях TEC проявляются не только собственно импульс *TCV*, но и сопутствующие *Pc5* пульсации. Скорость распространения ионосферного возмущения, оцененная по высокоамплитудным флуктуациям ПЭС оставляет около 3-4 км/с, в юго-западном направлении.

Вопрос о механизме воздействия TCV на ионосферу пока открыт. Ни одно из напрашивающихся объяснений не может быть безоговорочно принято. Высыпание энергичных (30–100 кэВ) электронов [2], которое может проявляться во всплеске риометрического поглощения сопровождающего TCV [19, 20], создает дополнительную ионизацию в нижних слоях ионосферы, который вносят малый вклад в ПЭС. Вариации ПЭС могут быть вызваны переносом низкоэнергичных электронов вдоль силовых линий в ионосферу, связанным с продольным током в структуре TCV [9]. Интенсивности продольных токов внутри TCV достаточно велики, что может вызвать появление аномального продольного электрического поля и ускорение электронов верхней ионосферы до энергий 0.1—1 кэВ [22]. Такие надтепловые электроны могут вызвать дополнительную ионизацию ионосферы на высотах F-слоя, дающего основной вклад в ПЭС. Однако для надежного обоснования механизма ионосферного отклика необходимо численное моделирование для реальных ионосферных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал принципиальную возможность использования GPS технологий для исследования динамики проявления магнитных возмущений в ионосфере Земли. Анализ вариаций ПЭС ввыявил наличие ионосферного отклика на магнитное возмущение *TCV* с амплитудой достигающей на отдельных станциях 150–200 нТл. Ионосферное возмущение представляет собой изолированные флуктуации ПЭС с амплитудой до 2 ТЕСи и с характерной длительностью ~10 мин. На некоторых широтах, импульс вызвал и появление сильно затухающих квазипериодических возмущений ПЭС с характерными частотами ~3.5–5.5 мГц. Скорость распространения ионосферного возмущения в азимутальном направлении ~3–4 км/с



Рис. 9. Сопоставление волновых форм геомагнитных (*X*-компонента) и ионосферных (вертикальный ПЭС) вариаций на близких магнитных станциях и GPS-треках.

согласуется со скоростью распространения магнитного импульса вдоль земной поверхности, определенной по данным магнетометров.

Работа поддержана грантами РФФИ № 18-05-00108 (ПВЕ, ПВА) и 18-35-00649 (ПВЕ). Мы признательные рецензенту за вдумчивое чтение нашей работы и полезные замечания. В работе использовались данные магнитометров сетей СА-RISMA (www.carisma.ca), Greenland Coastal Array (www.space.dtu.dk), и MACCS (space.augsburg.edu/ space/MaccsHome.html), а также архивные данные GPS наблюдений сетей IGS и UNAVCO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах // Космич. исслед. 2016. V. 54. Р. 23–33. Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C. et al. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 4672–4695.

- 3. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: ГУНЦРВХВСНЦ СО РАМН, 2006.
- Ясюкевич Ю.В. и др. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013.
- Komjathy A., Galvan D.A., Stephensetal P. Detecting ionospheric TEC perturbations caused by natural hazards using a global network of GPS receivers: The Tohoku case study // Earth Planets Space. 2012. V. 64. P. 1287–1294.
- 6. Ясюкевич Ю.В., Захаров В.И., Куницын В.Е., Воейков С.В. Отклик ионосферы на великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. по данным различных GPS методик // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. С. 1–10.

- 7. Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Стеблов Г.М. и др. Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исследования Земли из космоса. 2011. № 1. С. 30–38.
- 8. Захаров В.И., Куницын В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 4. С. 562.
- Pilipenko V., Belakhovsky V., Murretal D. Modulation of total electron content by ULFPc 5 waves // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 4358–4369.
- Korotova G.I., Sibeck D.G., Singer H.J. et al. Interplanetary magnetic field control of dayside transient event occurrence and motion in the ionosphere and magnetosphere // Annales Geophysicae. 2004. V. 22. P. 4197–4202.
- Lanzerott L.J., Wolfe A., Trivedy N. et al. Magnetic impulse events at high latitudes: magnetopause and boundary layer plasma processes // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 97–107.
- Lanzerotti L.J., Hunsucker R.D., Rice D. et al. Ionosphere and ground-based response to field-aligned currents near the magnetospheric cusp regions // J. Geophys. Res. 1992. V. 92. P. 7739–7743.
- McHenry M.A., Clauer C.R. Modeled ground magnetic signatures of flux transfer events // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 11231–11240.
- 14. Engebretson M.J., Yeoman T.K., Oksavik K. et al. Multiinstrument observations from Svalbard of a traveling convection vortex, electromagnetic ion cyclotron wave burst, and proton precipitation associated with a bow shock instability // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. № 6. P. 2975–299.

- Lanzerotti L.J., Lee L.C., Maclennan C.G. et al. Possible evidence of flux transfer events in the polar ionosphere // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 1089–1092.
- Kivelson M.G., Southwood D.J. Ionospheric travelling vortex generation by solar wind buffeting of the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 1661.
- Glassmeier K-H., Heppner C. Traveling magnetospheric convection twin vortices: another case study, global characteristics, and a model // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 3977–3992.
- Murr D.L., Hughes W.J. Solar wind drivers of traveling convection vortices // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 7, 1354, doi 10.1029/2002GL015498
- 19. Воробьев В.Г., Зверев В.Л., Старков Г.В. Геомагнитные импульсы в дневной высокоширотной области: основные морфологические характеристики и связь с динамикой дневных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 5. С. 69–79.
- Mende S.B., Rairden R.L., Lanzerotti L.J., Maclennan C.G. Magnetic impulses and related optical signatures in the dayside aurora // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 131.
- Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Пронин В.Е. Метод статистического определения уровня сбоев полной электронной концентрации по данным GPS наблюдений // Ученые записки физического факультета МГУ. 2017. № 1.
- Шалимов С.Л., Пилипенко В.А. Возможный механизм взаимосвязи интенсивных продольных токов в магнитосфере и гидромагнитных шумов диапазона Pi1 // Геомагн. и аэрономия. 1999. Т. 39. С. 23–28.