УДК 550.388.2

# ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ GPS ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ СУББУРИ

© 2020 г. В. И. Захаров<sup>1, 2, \*</sup>, А. А. Чернышов<sup>3</sup>, В. Милох<sup>4</sup>, Я. Джин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва, Россия <sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия <sup>3</sup>Институт космический исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия <sup>4</sup>Университет Осло, Физический факультет, г. Осло, Норвегия \*e-mail: zvi\_555@list.ru Поступила в редакцию 13.03.2020 г. После доработки 12.05.2020 г. Принята к публикации 21.05.2020 г.

Подробно изучено влияние геомагнитной активности на сбои навигационных сигналов системы глобального позиционирования GPS, а также увеличение амплитуды скачков полного электронного содержания в высоких широтах. Показано, что навигационный сигнал частоты  $L_2$  подвержен более частым сбоям, чем частоты  $L_1$ , как в спокойных условиях, так и во время геомагнитных возмущений. Вероятность скачков ПЭС выше, чем вероятность сбоев по фазе на частотах  $L_1$  и  $L_2$ . Максимум сбоев и частота больших скачков полного электронного содержания наблюдается во время фазы восстановления геомагнитной суббури. Используемые в настоящем исследовании данные камеры всего неба, магнитометров и межпланетного магнитного поля позволяют провести мониторинг временной эволюции суббури и детальное ее изучение. Указанные особенности поведения сигналов, по-видимому, вызваны высыпанием авроральных частиц, которые обычно происходят во время геомагнитных суббурь в высокоширотных регионах.

DOI: 10.31857/S0016794020060152

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) являются удобным инструментом в решении различных проблем как прикладного, так и научного характера. Постоянное повышение точности и надежности работы ГНСС имеет огромное практическое значение. Как известно, система позиционирования GPS (Global Positioning System) использует две частоты:  $f_1 = 1575.42 \text{ MFu}$ и  $f_2 = 1227.60 \text{ M}$ Гц, и обеспечивает высокую точность измерений групповых и фазовых задержек, которые происходят на трассе между наземным приемником и передатчиками на борту спутника GPS [Afraimovich et al., 2002; Hofmann-Wellenhof et al., 1998; Kaplan, 2005]. Эти измерения могут выполняться одновременно на двух указанных частотах практически в каждой точке земного шара в любое время. Число принимаемых пользователем сигналов ГНСС связано с состоянием среды распространения электромагнитного сигнала, в нашем случае такой средой является ионосфера Земли.

Электромагнитные волны, передаваемые спутниками ГНСС, имеют длину около двух дециметров и, прежде чем достичь наземного приемника, проходят через ионосферу, являющуюся ионизированной частью верхней атмосферы. Распределение заряженных частиц в ионосфере может оказывать существенное влияние на групповые, фазовые и амплитудные характеристики указанных волн. Измерения, проводимые с используются сигналов ГНСС, могут используются для получения значений полного электронного содержания (ПЭС) [Hofmann-Wellenhof et al., 1998; Pi et al., 1997], являющегося интегральной плотностью распределения электронов вдоль лучевой траектории между приемником и спутником, определяемой для трубки с поперечным сечением площадью 1 м<sup>2</sup>. Очевидно, что неоднородности плотности ионосферной плазмы влияют на электромагнитные волны во время трансионосферного распространения и могут привести к неверному определению фазы принимаемого сигнала или даже, при наличии значительной динамики во времени, к прекращению приема или сбою сопровождения сигнала конкретного спутника ГНСС.

Основными источниками ионосферных неоднородностей являются гелио- и геофизические возмущения околоземного пространства. Совокупность всех условий в околоземной плазме, в

основном связанных с солнечной активностью, определяются понятием "космическая погода" [Komjathy et al., 2010]. Околоземная плазма полвержена воздействию солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Различные физические явления, такие, как геомагнитные бури и суббури, полярные сияния, а также динамика радиационных поясов Ван Аллена, геомагнитноиндуцированные токи, солнечные вспышки и корональные выбросы массы и связанные с ними ударные волны являются важными факторами космической погоды и могут иметь заметное влияние на состояние магнитосферы и ионосферы [Afraimovich et al., 2002; Paschmann et al., 2002; Петрукович и др., 2015]. Одним из часто наблюдаемых эффектов являются сцинтилляции трансионосферных радиосигналов. Научная литература включает большое количество исследований, посвященных стабильности работы GPS и точности определения местоположения в возмущенных ионосферных условиях [например, Afraimovich et al., 2013; Jakowski et al., 2005; Demyanov et al., 2013]. Так, сильные сцинтилляции амплитуды и фазы сигналов могут возникать из-за рассеяния сигнала на мелкомасштабных неоднородностях электронной плотности [Yeh and Liu, 1982; Pi et al., 1997; Захаров и др., 2016], к тому же, большие сцинтилляции могут привести к срыву приема сигнала [Ledvina et al., 2002].

Высокоширотная ионосфера, как известно, характеризуется неустойчивостями и мелкомасштабными неоднородностями плотности плазмы [Aarons, 1997; Чернышов и др., 2015, 2017; Ilysov et al., 2015], которые могут быть связаны с электрическими полями и высыпанием энергичных частиц из хвоста магнитосферы в ионосферу. Например, наибольшее количество сбоев при определении ПЭС в периоды геомагнитных бурь нблюдается вблизи аврорального овала [Astafyeva et al., 2014]. Таким образом, важно проводить детальные исследования ионосферных эффектов на распространение навигационного сигнала в высоких широтах [Basu et al., 1985].

Говоря о "сбоях", исследователи обычно понимают инструментальные сбои в измерениях псевдодальности или фазы, т.е. случаи, когда невозможно измерить псевдодальности  $P_1$  and  $P_2$ или фазы для рабочих частот  $L_1$  и  $L_2$ . Это определение не включает случаи конечных скачков в фазе навигационного сигнала, которые связаны с качеством работы фазометра [Aarons and Lin, 1999; Afraimovich et al., 2002]. Сбои в навигационном GPS сигнале в период 2010–2014 гг. изучались в работе [Захаров и др., 2016] для приемных станций, расположенных в Арктике. В указанной статье проведен анализ вероятностей потерь инструментальной фазы и сбоев в определении псевдодальности, а также рассмотрены кратко-

временные вариации высокоскоростных измерений ПЭС при различных геомагнитных условиях. Было получено, что вероятность больших скачков в ПЭС значительно (в 100-200 раз) выше, чем частота инструментальных сбоев, она увеличивается во время геомагнитных бурь и суббурь. Сравнение сбоев в навигационных сигналах GPS и ГЛОНАСС, а также сбоев в измерениях ПЭС было представлено в статье [Ясюкевич и др., 2017], где анализ проводился для станций как на высоких, так и на средних широтах при различных геофизических условиях в период с ноября 2014 г. по июль 2015 г. В спокойных геомагнитных условиях плотность скачков ПЭС более определенной пороговой величины в средних широтах не превышает 12% и их динамика коррелирует с К, или для высокоширотной ионосферы с АЕ-индексами во времени. В высоких широтах плотность скачков ПЭС зимой выше, чем летом, и достигает 50-60%. Кроме того, частота скачков ПЭС в 2–2.5 раза выше в высоких широтах, чем в средних широтах. В работе [Kozyreva et al., 2017] авторы рассмотрели возмущения ПЭС в полярной ионосфере с использованием GPS сигналов до и во время магнитной бури 5 апреля 2010 года. Было показано, что начало суббури вызывает значительное усиление сцинтилляций ПЭС, характеризующихся производной по времени ПЭС, поскольку навигационные сигналы испытывают более сильные сцинтилляции при прохождении через нерегулярную среду, например, в ионосфере высоких широтах. Сбои или скачки фазы сигнала GPS, приводящие к скачкам ПЭС (по уровню более 1 ТЕСИ/мин), происходят преимущественно внутри аврорального овала и вблизи его экваториальной границы и отражают динамику процессов в ионосферной плазме высоких широт.

В настоящей статье мы изучаем два типа событий, рассмотренных в работе [Захаров и др., 2016; Ясюкевич и др., 2017]. Первый тип событий – это "инструментальные" сбои, включающие потери в измеренной фазе сигнала GPS, которые рассматриваются в данных как кратковременное отсутствие этих параметров (псевдодальностей и фаз), измеренных на данной рабочей частоте. Эти сбои носят, в основном, технический характер, отражая качество электронных компонентов приемника пользователя, и потенциально могут влиять на точность навигационного позиционирования [Jakowski et al., 2005; Kaplan, 2005]. Вторая группа процессов связана с изучением динамики вариаций ПЭС на основе зарегистрированных приемником сигналов. Этот тип "сбоев" или, в этом случае скорее, больших скачков, можно рассматривать как резкие вариации ПЭС, которые связаны с фазовой динамикой сигнала при его рассеянии в случайно-неоднородной среде или с еще неизвестными процессами или явлениями в плазме.

В настоящей работе подробно изучается влияние геомагнитной суббури 23 декабря 2014 г. между 19:00 и 23:59 UT, на сбои в фазах и псевдодальностях на частотах  $L_1$  и  $L_2$ , а также на большие скачки ПЭС в высоких широтах. Для более полного анализа используются оптические данные с камеры всего неба, магнитометров и межпланетного магнитного поля, чтобы наблюдать временную эволюцию суббури. В первую очередь мы исследуем влияние возмущенной ионосферы на работу навигационной системы GPS, а также анализируем сбои основных параметров навигационных сигналов GPS. Уникальность проведенного рассмотрения определяется набором используемых данных магнетометра, камеры всего неба и четырех GPS-приемников, проводивших измерения именно в непосредственной близости к первым двум приборам.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Известно, что ионосфера вызывает задержку радионавигационных сигналов, идущих со спутника на приемную станцию. Величина этой задержки пропорциональна полному электронному содержанию (ПЭС) и может быть рассчитана с использованием измерений несущей фазы сигнала GPS. Расчет ПЭС на основе двухчастотных измерений фазы сигнала GPS [Hofmann-Wellenhof et al., 1998] проводится по формуле:

$$\Pi \Theta C = \frac{1}{40.308} \times$$

$$\times \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL],$$
(1)

где  $f_1 = 1575.42$  МГц и  $f_2 = 1227.6$  МГц – рабочие частоты GPS,  $L_1\lambda_1$  и  $L_2\lambda_2$  являются дополнительными путями радиосигналов, обусловленными сдвигом фазы в ионосфере,  $L_1$  и  $L_2$  – число оборотов фазы на основных частотах GPS,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн, K – константа, определяемая неоднозначностью фазовых измерений, а nL – ошибка в определения фазового пути.

Измерения ПЭС часто используются для изучения ионосферного отклика на различные геофизические события [Afraimovich et al., 2013; Demyanov et al., 2013]. Отмечено, что регулярная скорость изменения ПЭС ионосферы в спокойных условиях обычно меньше 1 ТЕСU/мин [Захаров и др., 2016; Ясюкевич и др., 2017; Когугеva et al., 2017]. Однако в ионосферных исследованиях также встречается и другая задача, которая заключается в изучении влияния ионосферы на свойства трансионосферных радиосигналов. Одним из аспектов такого подходов является вероятностная оценка сбоев навигационного сигнала на основных рабочих частотах. Как правило, приемник GPS может очень точно измерять дробную часть фазы несущей, полученной от спутника, а также накапливать общее количество циклов несущей во времени [Hofmann-Wellenhof et al., 1998]. Изменяющаяся плотность электронов вдоль пути от спутника до приемника могут вызывать быстрые колебания сигналов GPS по фазе и амплитуде, что может привести к временному срывам сопровождения этих сигналов. Наряду с этим, есть и другие причины потерь измерений несущей фазы, такие как помехи или внешние шумы. Это состояние приемника принято называть явлением проскальзывания цикла измерений фазы ("cycle slip"), оно может существенно повлиять на произволительность спутниковых приложений, а также на мониторинг ионосферы. Другими словами, приемник может пропустить подсчет определенного количества циклов, что приводит к разрывам в интегрированной фазе.

Можно ожидать, что вероятность сбоев при определении ПЭС превышает вероятности сбоев для каждой фазы. Действительно, на определение ПЭС влияют как дополнительные фазовые неопределенности в формуле (1), так и регулярные свойства возмущенной ионосферы. Следует отметить, что несколько методов коррекции проскальзывания цикла были введены, например, в статьях [Bastos and Landau, 1988; Prikryl et al., 2010], они не носят абсолютного характера и в настоящей работе мы их не обсуждаем. Таким образом, операционные сбои включают в себя два типа событий, которые мы довольно подробно определили выше.

Угол возвышения (угол места) также важен для изучения ионосферы. В спокойных условиях изменение ионосферной задержки между спутником и приемником главным образом связано с изменяющимся углом возвышения спутника [Hofmann-Wellenhof et al., 1998]. Как правило, для ионосферы значение порогового угла возвышения устанавливается равным 10 или 15 градусам. Однако Komjathy et al. (1997) предлагают использовать более низкий угол отсечки по высоте, поскольку максимальная ошибка оценки ПЭС меньше 2 ТЕСИ и скорость ее изменения в спокойных условиях обычно находится на уровне 1 TECU/мин. Преимущество использования более низких углов отсечки по высоте может быть двояким: легче отделить ПЭС от дифференциальной задержки принимаемого сигнала [Komjathy et al., 1997], а также обеспечить лучший охват пространственных данных [Kozyreva et al., 2017]. С другой стороны, даже при углах места, превышающих 30 градусов, эффекты многолучевого распространения могут привести к сдвигу фаз и искажению определения псевдодальности из-за помех в сигнале, что следует учитывать при анализе результатов. В нашем исследовании мы выбираем угол возвышения 10 градусов, чтобы иметь лучшее покрытие и по возможности уменьшить эффекты многолучевого распространения.

В настоящей работе для определения ПЭС рассмотрены фазы двух рабочих частот и построена оценка ПЭС по формуле (1). Для того чтобы исключить неопределенность начальной фазы зарегистрированных сигналов, вместо изучения самого ПЭС оценивается скорость изменения ПЭС (то есть временная производная ПЭС: d(ПЭС)/dt) [Hofmann-Wellenhof et al., 1998; Захаров и др., 2008]. Помимо этого, d(ПЭС)/dt используется для обнаружения сдвигов фаз [Захаров и др., 2016). Если имеется скачок выше определенного порогового значения, это указывает на наличие скачка (или сбоя) фазы.

Пороговое значение выбирается на основании компромиссных условий [Aarons, 1997; Komjathy et al., 2010]. С одной стороны, пороговое значение должно быть достаточно низким, чтобы увеличить чувствительность проводимого анализа; с другой стороны, пороговое значение должно быть достаточно большим, чтобы избежать ложных сбоев, которые возникают из-за изменчивости и ошибок в оценке ПЭС. Пороговое значение 1 TECU/мин, выбранное в работе, в целом удовлетворяет вышеуказанным требованиям. Зная количество значений производной  $d(\Pi \Theta C)/dt$ , которые превышают пороговое значение, можно рассчитать вероятность появления такого скачка. Вероятность статистически значима для большого количества измерений. Также важно, чтобы в качестве критерия отбора возникновения сбоев или скачков был выбран высокий уровень достоверности. Таким образом, представленное исследование включает в себя 5 ч комбинированных наблюдений P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> (данные в формате RINEX) и вычисленного по фазам ПЭС, которые дают более 6000 измерений для каждого указанного параметра для одного приемного устройства, полная статистика для каждого параметра составляет более 25000 измерений, что позволило в работе использовать уровень достоверности 99%.

Рассчитаем распределения сбоев  $P_{T,i,GPS}$  по времени для каждого наблюдаемого спутника (GPS PRN) следующим образом:

$$P_{T,i,\text{GPS}} = \frac{N_{i,\text{GPS}}(T)}{S_{i,\text{GPS}}} \times 100\%,$$
 (2)

где  $N_i(T)$  — общее количество сбоев исследуемого сигнала "*i*" (здесь под "*i*" понимается ПЭС,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $P_1$  и  $P_2$ ), записанных для данного спутника GPS в течение времени наблюдения T и  $S_i$  — общее количество ежедневных наблюдений сигнала *i* от видимого спутника GPS. Временной интервал Tвыбирается на основе пригодности набора данных для статистических расчетов и доступной памяти компьютера. В нашей работе мы используем данные наблюдений, получаемые на приемных устройствах с периодичностью 30 с. Для получения статистически значимых результатов, вероятности сбоев или скачков ПЭС нами определяются для периода 1 ч. В качестве общего числа наблюдений при нормировке вероятности мы используем полное количество наблюдений за весь день, а не за 1-часовой период. Такой подход позволяет избежать переоценки вероятности сбоев в неполные часы видимости навигационного спутника, что крайне важно для анализа конкретной суббури.

Наконец, в работе оценивается вероятность сбоев параметра "*i*", измеренная на каждой приемной станции для всех видимых навигационных спутников *N*<sub>GPS</sub>:

$$P_{T,i} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\rm GPS}} (N_{i,\rm GPS}(T))_j}{\sum_{j=1}^{N_{\rm GPS}} (S_{i,\rm GPS})_j} \times 100\%.$$
 (3)

Таким образом, экспериментальные данные позволяют сделать прямые оценки сбоев принимаемых сигналов или больших скачков ПЭС, проявляющихся на каждой станции для всех навигационных спутников.

Для изучения морфологии полярных сияний и эволюции авроральной суббури используется камера всего неба, расположенная на норвежской ст. Скиботн (69.348° N, 20.363° E; *AACGM* (Altitude adjusted corrected geomagnetic coordinates) 66.28° N, 103.41° E), а также данные по межпланетному магнитному полю (ММП) *OMNI IMF* и данные с наземного магнитометра в Тромсе. Камера работает в Скиботн с октября 2014 г., имеет высокое отношение сигнал/шум и узкополосные оптические фильтры [Jin et al., 2015]. Камера всего неба записывает изображения на длинах волн 630.0 нм и 557.7 нм каждые 30 и 15 с соответственно.

На ст. Скиботн камера всего неба работает вместе со сцинтилляционным приемником GPS, который позволяет осуществить сцинтилляционный мониторинг при определении ПЭС. Приемник использует модель GSV4004 [Van Dierendonck et al., 1993], которая вычисляет амплитудные и фазовые сцинтилляционные индексы, а также ПЭС на основании двухчастотных измерений. Временное разрешение данных составляет 1 с, мы их прореживаем и используем измерения, синхронные по времени с измерениями фазы и псевдодальности, получаемые на других навигационных приемниках.

Для изучения пространственной изменчивости измерений GPS ПЭС в высокоширотной области мы используем 4 приемника GPS в скандинавском секторе: ст. Тромсё или TRO1-код станции



Рис. 1. Расположение станций GPS, данные которых использованы в статье.

в сети IGS с координатами (69.663° N, 18.940° E), ст. Скиботн или SKBN (69.348° N, 20.363° E), ст. Кируна или KIRU (67.857° N, 20.968° Е) и ст. Соданкюля или SODA (64.879° N, 21.048° E). Надеемся, что такое двойное наименование не вызовет сложностей у читателя, поскольку приемники GPS расположены в непосредственной близости от соответствующего населенного пункта, их схематическое положение изображено на рис. 1. Данные со ст. SKBN берутся непосредственно из приемника с разрешением 1 с, данные с других приемников GPS взяты из Международной службы ГНСС IGS – International GNSS Service, в формате RINEX – Receiver Independent Exchange Format (http://www.igs.org/). Файлы RINEX предоставляют данные с разрешением 30 с.

# 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном исследовании нами рассматривается авроральная суббуря 23 декабря 2014 г. между 19:00 и 23:59 UT. На рисунке 2 показаны геомагнитные индексы *AE* и *AO*, характеризующие геофизическую обстановку 23 декабря 2014 г. (http:// wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html). Умеренная геомагнитная суббуря началась после 19 UT. Как видно из рис. 2, максимальное значение индекса *AE* наблюдалось приблизительно в 22 UT и достигло значений ~1000 нТл.

На рисунке 3 показан обзор явлений, протекающих во время изучаемого события и регистрируемых с помощью различных приборов, описанных выше. Панели (а) и (б) показывают оптические данные с камеры всего неба на ст. Скиботн на длинах волн 630 нм и 577.7 нм соответственно, которые представлены в виде кеограммы (Chernyshov et al., 2017). Данные представляют временную эволюцию интенсивности излучения вдоль магнитного меридиана на углах места α от 15° N до 165° S. Данные по межпланетному магнитному полю Н<sub>ММП</sub> приведены на панели в), где указаны различные компоненты ММП (*Bz*, *By* – в системе координат GSM (Geocentric solar magnetospheric)). Компонента ММП Вг изменила свой знак и повернулась с севера на юг с 19 UT и оставалась отрицательным до 21:20 UT. При такой ориентации межпланетного поля происходит магнитное пересоединение на дневной магнитопаузе и последующее расширение полярной шапки. Это расширение хорошо видно по экваториальному движению аврорального овала с 19:30 UT на панелях (a)-(b). Начало суббури было около 20:45 UT, когда сияние авроры внезапно усилилось и происходит его расширение к полюсу, после чего все небо было покрыто дугами авроральных сияний. Кроме того, можно наблюдать несколько авроральных стримеров, движущихся экваториально от северного края аврорального овала. Соответ-



Рис. 2. Изменения геомагнитных индексов АЕ и АО, характеризующие авроральный электроджет, за 23 декабря 2014 г.

ствующие ионосферные токи отражаются в Н-и Z-компонентах магнитного поля, которые измеряются магнитометрами на соседней ст. Тромсё панель (г) обсуждаемого рис. 3. Внезапное уменьшение компоненты H около 20:45 UT указывает на начало геомагнитной суббури, которая стремительно развивается, компонента Н около 21 UT достигает значения -500 нТл. В то же время Z-составляющая магнитного поля увеличивается, из чего следует, что западный авроральный электроджет расположен в основном южнее Тромсё. Эта картина хорошо согласуется с наблюдаемыми полярными сияниями с помощью камеры всего неба, которые указывают на наличие сильных полярных свечений в южной части поля зрения. Дальнейший анализ ПЭС GPS и его скорости во времени также показывают увеличение динамики ионосферной плазмы во время суббури. Изменения ПЭС характеризуются крупномасштабными колебаниями, которые, вероятно, связаны с процессами авроральной ионизации вследствие высыпания заряженных частиц [Jin et al., 2014].

Теперь, имея представления о геомагнитных условиях, изучим сбои в сигналах GPS ( $L_1, L_2$ ) и оценим вероятности скачков ПЭС по формуле (1) с использованием GPS данных станций TRO1, SKBN, KIRU и SODA. На рисунке 4 приведено временное распределение вероятности сбоя фазы для частоты L<sub>1</sub>, измеренной на ст. Скиботн для выбранных спутников, а также для всех спутников в поле зрения, как указано в выражениях (2) и (3), соответственно. Вероятность сбоев фазы для  $L_1$  увеличивается после 19 UT, как видно из верхней панели, и число сбоев L<sub>1</sub> значительно увеличивается между 20 и 23 UT, с пиком между 22 и 23 ч. Необходимо отметить, что начало геомагнитной суббури происходит примерно в 20:45 UT (рис. 2 и 3), в то время как расширение аврорального овала наблюдается с 19:30 UT 23 декабря 2014 г. Заметно значительное влияние суббуревой активности на работу GPS, так как вероятность сбоев  $P_{T,L,GPS}$  достигает 0.4—0.5% на фазе восстановления для принимаемых в это время спутников, что является увеличением в 3—5 раз по сравнению со спокойными ионосферными условиями. Эти данные относятся ко всем видимым спутникам GPS при углах возвышения  $El > 10^\circ$ . Средняя вероятность сбоев по псевдодальности увеличивается с 0.0175% до 0.05% в течение суббури.

Заметим, что в течение исследуемого периода сбои  $L_1$  не регистрируются на станциях SODA и TRO1, а в KIRU имеют место только отдельные события, поэтому соответствующие результаты для сбоев фаз в SODA, TRO1 и KIRU не приведены.

Мы склонны связывать наблюдаемые явления с особенностями и определенной уникальностью рассмотренного события и его развития в пространстве относительно расположения размещенных станций.

Напомним, что проведенный геофизический анализ показывает, что внезапное уменьшение компоненты *Н*около 20:45 UT указывает на начало геомагнитной суббури, которая стремительно развивается. В то же время Z-составляющая магнитного поля увеличивается, из чего следует, что западный авроральный электроджет расположен в основном южнее Тромсё. Это хорошо согласуется с наблюдаемыми с помощью камеры всего неба полярными сияниями, которые указывают на наличие сильных свечений в южной части поля зрения. Анализ GPS-ПЭС и скорости его изменения во времени также показывают разную динамику ионосферной плазмы в различных пространственных областях во время суббури. Изменения ПЭС характеризуются крупномасштабными вариациями, которые, вероятно, связаны с процессами авроральной ионизации вследствие высыпания заряженных частиц, индикатором которых и является светимость.

Это обстоятельство и является, как представляется, вероятной причиной малой динамики



**Рис. 3.** Обзор событий 23 декабря 2014 г. Сверху вниз: панели (a), ( $\delta$ ) – оптические данные в виде кеограммы с камеры всего неба на 630.0 нм и 557.7 нм соответственно (интенсивность полярных сияний kR и имеет тоновую кодировку на правой стороне каждой панели). Панель (a) – динамика межпланетного магнитного поля  $H_{MM\Pi}$  во время суббури и (c) – компоненты H и Z магнитного поля  $H_{TRO}$  наземного магнитометра в Тромсё.

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 60 № 6 2020



**Рис. 4.** Временное распределение сбоев фазы на частоте  $L_1$  (панель (*a*)) и усредненная вероятность сбоев фаз на частоте  $L_1$  (панель (*b*)) 23 декабря 2014 г. для всех видимых спутников GPS на станции SKBN. Угол возвышения более 10°.

сбоев фазы на ст. TRO1. Камера всего неба показывает, что наиболее интенсивные изменения светимости (сполохи) наблюдаются на широте ст. SKBN, а над ст. SODA регистрируется относительно слабое свечение. Станция KIRU попадает в область слабо меняющейся светимости, что проявляется в виде вариаций ПЭС в начале и конце этой пространственной области проявления полярных сияний.

Заметим также, что существует отличие в приемниках, поскольку на всех наблюдательных пунктах стоят разные радиоприемные навигационные устройства (РПУ) и используются различные антенны. Однако анализ, приведенный ранее в статье [Захаров и др. 2017], где рассмотрены более 400 РПУ сети IGS разных типов в различных гео- и гелиофизических условиях, фазах минимума и максимума 24 солнечного цикла (2010 и 2014 гг.), показывает, что такие значительные различия регистрируемых параметров превосходят возможную вариабельность данных от разных приемников, и скорее всего, не связаны с типами РПУ, использовавшихся в нашем эксперименте. Тем не менее, для однозначной интерпретации полученных результатов в этой части нет достаточной информации.

Согласно основному контрольному документу GPS [IS-GPS-200 2012], система GPS имеет разные мощности регулярно излучаемых сигналов для двух навигационных частот, а именно, приблизительно на 3 дБ меньше для частоты  $L_2$ , чем для  $L_1$ . Этот факт, вместе со значительно увеличивающимся поглощением радиоизлучения вследствие высыпания авроральных частиц во время магнитных суббурь, может привести к значительным различиям в вероятности сбоев фазы между двумя разными рабочими частотами. На рисунке 5 мы представляем данные по сбоям фаз на частоте  $L_2$ , рассчитанной с помощью формулы (2), за тот же период времени для станций SODA и SKBN.

Как показано на рис. 5, вероятность сбоя фазы  $L_2$  увеличивается после 19 UT в SKBN и после 20 UT в SODA. Максимальное количество сбоев по  $L_2$  наблюдается с 21 до 23 UT на ст. SKBN и чуть позже, с 22 до 23:59 UT на ст. SODA. Макси-



Рис. 5. Временное распределение сбоев фазы на частоте  $L_2$  на станциях (*a*) SODA и (б) SKBN. Усредненная вероятность сбоев фазы на частоте  $L_2$  на станциях (в) SODA и (г) SKBN для всех видимых спутников GPS на этих станциях. Угол возвышения больше 10°.

мальные значения достигаются до 23 UT в SKBN и до 24 UT в SODA (рис. 5*a* и 5*б*)). В ходе развития суббури вероятность сбоев  $P_{T,L_2,GPS}$  увеличивается с 0.1% до 0.4%. Для фазы восстановления/роста вероятность сбоев достигает 0.5% (увеличение в 5 раз) для ст. SKBN. Вероятность сбоев P<sub>T,L2,GPS</sub> ст. SODA увеличивается с малых значений до 0.15%. Усредненная вероятность сбоев фазы на частоте  $L_2$  на этих станциях для всех видимых спутников GPS и для углов места El больше 10° для 23 декабря 2014 г. дает оценку вероятности сбоев *Р*<sub>*T,L*<sub>2</sub></sub>, увеличивающиеся от 0.002% до 0.015% для SODA и от 0.015% до 0.05% для SKBN. На фазе восстановления вероятности сбоев составляют соответственно от 0.014% до 0.05%, как показано на рис. 4в и 4г. Интересно, что суббуря приводит к увеличению сбоев L<sub>2</sub> на станциях SODA и SKBN с задержкой в несколько часов, что, вероятно, связано с особенностями развития плазменной турбулентности, возникающей из-за геомагнитных возмущений и рассмотренной выше, в обзоре явлений, протекающих во время изучаемого события.

На рисунке 6 представлены данные для сбоев ПЭС от четырех станций. Отчетливо видно, что вероятность больших скачков ПЭС увеличивается с началом суббури (около 20 UT) и достигает пиковых значений на этапах восстановления и роста. Таким образом, максимальные значения для станций SODA, KIRU, TRO1 и SKBN составляют соответственно 1.4%, 2%, 2% и 4%. Критерий определения величины скачка обсуждался ранее и составляет величину изменения ПЭС более 1 ТЕСИ/мин. Рисунок 7 дополняет полученные результаты и показывает, что количество больших скачков ПЭС увеличиваются в 5–10 раз во время геомагнитной суббури по сравнению со

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ 2020 том 60

спокойными условиями в околоземном пространстве.

Наши исследования показывают, что в условиях рассмотренной суббури вероятность скачков ПЭС в 10 раз выше, чем вероятность сбоев по фазе  $L_2$ , и в 6 раз выше, чем  $L_1$  на ст. SKBN. На станции SODA наблюдаются аналогичные результаты – вероятность скачков ПЭС в 10 раз выше, чем вероятность сбоев по фазе  $L_2$ .

Приведем результаты корреляционного анализа взаимосвязей сбоев параметров L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> с динамикой магнитной суббури и развитием оптических явлений.

Коэффициент корреляции определялся для интервала наблюдений 18-24 UTC, т.е. для 6-ти часового интервала. На каждом 1-часовом интервале определялось полное количество сбоев параметров принимаемых сигналов (псевдодальности и фазы для обоих рабочих частот) или скачков ПЭС. Для оптических данных на этом же интервале определялась интегральная светимость по всей области обзора ("всему небу") на соответствующей длине волны. Аналогично обрабатывались данные индекса АЕ и измеренного магнитного поля в Тромсе.

В данной работе использованы данные магнитометра в Тромсе и высокоширотного магнитного индекса АЕ. Получено, что сбои по фазе линейно связаны с индексом АЕ с коэффициентом корреляции приблизительно 0.65. В то же время, использование региональных данных магнитометра Тромсе увеличивает коэффициент корреляции до 0.8. Аналогичные результаты получены и при анализе сбоев псевдодальности P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>. Подобные зависимости получены и для других станций - коэффициенты корреляции сбоев фаз и



**Рис. 6.** Временное распределение скачков ПЭС (скорости более 1 TECu/min) для всех видимых спутников GPS на станциях: (*a*) SODA; (*b*) KIRU; (*b*) TRO1 и (*c*) SKBN.

псевдодальностей с индексом *AE* для них составляют величины в диапазоне значений 0.65–0.75.

Данные оптических измерений показывают значительную корреляцию со скачками ПЭС – коэффициент корреляции около 0.9, причем для станции Скиботн, где и расположена камера всего неба, корреляция сохраняется и для меньших интервалов времени – 15 и 30 мин. Также имеет место высокая корреляция ПЭС с вариациями магнитного поля, измеренного магнетометром Тромсе, которая составляет 0.85. Для других станций использование данных магнетометра в Тромсе также увеличивает корреляцию локально измеренного магнитного поля со сбоями параметров сигналов и наблюдаемыми скачками ПЭС по сравнению с результатами, использующими данные индекса *AE* и рассмотренными выше. Таким образом, при анализе суббурь имеет смысл пользоваться по возможности, данными местных магнитометров. Высокоширотные геомагнитные индексы типа AE, которые получены усреднением данных по 12 станциям, хорошо зарекомендовавшие себя для анализа динамики магнитных суббурь, оказываются все же более грубыми для использования в локальных условиях.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Высыпание высокоэнергичных частиц в авроральном овале играет важнейшую роль в структурировании высокоширотной ионосферы и влияет на распространение трансионосферных радиоволн. Поэтому мониторинг таких геофизических условий имеет большое значение для распростра-



**Рис.** 7. Усредненная вероятность скачков ПЭС (скорости более 1 TECu/min) на станциях (*a*) SODA; (*б*) KIRU; (*в*) SKBN; (*г*) TRO1 для всех видимых спутников GPS 23 декабря 2014 г. Угол возвышения больше 10°.

нения волн и производительности систем ГНСС. Геомагнитные бури и суббури могут оказать существенное влияние на состояние ионосферы и, соответственно, на работу ГНСС, которые используют радиосигналы, распространяющиеся через ионосферу Земли. Большие и быстрые изменения электронной плотности в полярной ионосфере во время геомагнитных бурь влияют на условия распространения и рассеяния радиоволн и приводят к колебаниям фазы и амплитуды сигналов GPS, также известным как ионосферные сцинтилляции, которые могут стать причиной к сбоям и потерям несушей частоты. Известно, что такие сцинтилляции вызваны мелкомасштабными неоднородностями с характерными размерами порядка размера зоны Френеля [Pi et al., 1997; Yeh and Liu, 1982]. Напомним, что на частотах GPS (1.227 и 1.575 ГГц) масштаб первой зоны Френеля равен 150-300 м для высот слоев Е и Гионосферы.

В настоящее время считается, что многочисленные большие скачки ПЭС в основном отражают временну́ю изменчивость среды и происходят на границе аврорального овала, который является

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 60 № 6 2020

областью с ионосферными неоднородностями различного масштаба. В нашей работе эта точка зрения расширена. Представляется доказанным, что динамика в навигационных сигналах GPS может быть связана с высыпанием энергичных заряженных частиц в высокоширотной ионосфере, например, к северу от границы аврорального овала. Этот факт следует из проведенного прямого сопоставления динамики сигналов GPS (сбоев изучаемых параметров и скачков ПЭС) с оптическими явлениями во время магнитной суббури. Следует заметить редкость совместной работы всех приборов, используемых для изучения явлений во время геомагнитной активности. Также учтем, что с использованием оптических и магнитометрических данных можно уточнить границы аврорального овала и использовать эти данные для интерпретации полученных данных о сбоях в работе навигационных приемников.

Высыпание ускоренных частиц из магнитосферы вызывает усиление оптических эмиссий, поэтому можно ожидать полученную корреляцию сцинтилляций ПЭС и полярных сияния. Быстро движущаяся авроральная дуга в ионосфере может вызывать кратковременную структуру с повышенной электронной плотностью, связанную с авроральным сиянием [Коzyreva et al., 2017], которая вызовет дополнительную фазовую динамику сигнала, что может привести к срыву сопровождения фазы принимаемого спутника GPS.

В работе уточняется взаимосвязь между появлением сбоев и больших скачков основных параметров GPS сигналов во время развития геомагнитной суббури 23 декабря 2014. Численные значения производной  $d(\Pi \Theta C)/dt$  достигли значений (2-3.8) TECU/мин во время суббури, и такие скачки значений ПЭС превышают регулярную изменчивость ионосферы, которая обычно меньше (0.1–1) ТЕСИ/мин. Статистический анализ данных для выбранных станций дает среднее значение вероятности сбоя для каждого спутника. Сравнение результатов GPS-приемников и оптических данных показывает, что ГНСС реагирует на возмущенные условия в полярной ионосфере. Основной причиной сбоев является поглощение сигнала в ионосфере высоких широт за счет высыпаний высокоэнергетических авроральных частиц. Нужно заметить, что общее количество сбоев ПЭС начинает резко расти после начала основной фазы суббури.

Ионосферные сцинтилляции возникают в результате рассеяния сигнала на неоднородностях электронной плотности в ионосфере и приводят к снижению отношения сигнал/шум, что, в свою очередь, снижает точность позиционирования. Такие эффекты заметно усиливаются во время геомагнитных бурь. Существует несколько исследований, показывающих, что из-за влияния неблагоприятных геофизических факторов качество измерений радионавигационных параметров в частотном диапазоне  $L_2$  ухудшается. Например, в работах [Skone and de Jong, 2000; Демьянов и Ясюкевич, 2014] было установлено, что сбои измерения фазы несущей происходили в основном на вспомогательной частоте GPS L<sub>2</sub>. Фазовые сбои сигнала происходили чаще для станций, расположенных в высоких широтах, чем на станциях низких широт. Было показано, что как диапазон кодовых измерений, так и измерения фазы во время геомагнитных возмущений подвержены ошибкам. Эти результаты, в целом, подтверждаются результатами нашей работы.

Современные представления о причинах ухудшения сигналов в дециметровом диапазоне длин волн недостаточны для детального анализа механизмов, ответственных за измерения фазы и кода в системе GPS. Как было обнаружено ранее [Frernouw et al., 1985], высоко положительная корреляция роста плотности фазовых сбоев и интенсивности вариаций ПЭС при геомагнитных возмущениях указывает на то, что увеличение сбоев измерений может быть связано с неоднородностями ионосферной плазмы. В то же время увеличивается длина временных интервалов, когда, например, из-за роста поглощения, уровень сигнала становится ниже уровня помех, что приводит к сбою отслеживания сигнала [Демьянов и Ясюкевич 2014]. Однако для более мощного сигнала в полосе частот  $L_1$  длительность таких интервалов на порядок меньше, чем для менее мощного сигнала L<sub>2</sub>. В периоды геомагнитных возмущений околоземной плазмы, обусловленных появлением интенсивных неоднородностей плотности плазмы, часто преобладает эффект интерференционного затухания амплитуды сигналов ГНСС, а также сцинтилляции амплитуды и фазы. Сцинтилляционная статистика в авроральной зоне показала сильную корреляцию между частотой их появления и геомагнитной активностью.

Частота L<sub>2</sub> характеризуется меньшим отношением сигнал/шум, что делает ее гораздо более чувствительным индикатором сбоев фазы. Это меньшее отношение сигнал/шум на частоте  $L_2$ в основном обусловлено меньшей мощностью передатчика  $L_2$  по сравнению с передатчиком базовой частоты L<sub>1</sub> с кодом С/А [Ясюкевич и др., 2013]. Подобное различие в эффективно излучаемой мощности сигнала  $L_1$  и  $L_2$  характерно и для российской глобальной навигационной спутниковой системы – ГЛОНАСС [Afraimovich et al., 2013; Ясюкевич и др., 2013]. Сбои фазы на частоте  $L_2$  также могут быть вызваны более низким отношением сигнал/шум при использовании коммерческих приемников. Эти приемники не имеют доступа к специализированному У-коду и вынуждены использовать режимы без кода или полукода. В результате отношение сигнал/шум в такого рода приемниках ниже, чем при кодированном приеме.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе влияние магнитной суббури на сбои навигационных параметров в высокоширотном регионе исследовано вместе с оптическими данными, полученными с камеры всего неба, а также данными магнитометров и межпланетного магнитного поля, которые использовались для более полного анализа ионосферных условий и понимания их изменений во время геомагнитной суббури. Насколько нам известно, в работе впервые сопоставлены сбои в параметрах GPS с оптическими и магнитными явлениями во время геомагнитного возмущения с учетом развития пространственной динамики возмущения. Получено, что сбои в навигационных сигналах GPS связаны с высыпанием авроральных частиц в высокоширотной ионосфере. Подвержены результаты других работ, о том что частота  $L_2$  имеет

большую вероятность сбоев, чем  $L_1$ , как в спокойных условиях, так и во время геомагнитной активности в полярных областях. В результате нашего исследования показано, что вероятность больших скачков ПЭС в несколько раз выше, чем вероятность сбоя по фазе на частотах  $L_1$  и  $L_2$ . Установлено, что авроральная суббуря приводит к увеличению сбоев L<sub>2</sub> на станциях Сонданкюля и Скиботн с задержкой в несколько часов, что мы связываем с особенностями развитием плазменной турбулентности, возникающей из-за магнитных возмущений на высоких широтах. Максимум возникновения сбоев приходится на фазу восстановления геомагнитной суббури. Этот факт отражает динамику влияния суббури на ионосферу и, по всей вероятности, связан с динамикой неоднородностей и неустойчивостей плазмы во время геомагнитной активности. Показан рост инструментальных сбоев фаз L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> навигационных сигналов и рост частоты больших скачков ПЭС, рассчитанной на их основе, на восстановительной фазе суббури. Отметим, что рост В<sub>2</sub>-компоненты межпланетного поля (см. рис. 2) происходит на фазе восстановления суббури, что является косвенным индикатором роста указанной выше турбулизации параметров плазмы. Кроме того, проведенный в работе корреляционный анализ взаимосвязей сбоев параметров  $L_1, L_2$  и скачков ПЭС показал их значительную корреляцию как с динамикой развития магнитной суббури, т.е. с вариациями магнитного поля, так и с оптическими явлениями. Коэффициенты корреляции сбоев фаз и псевдодальностей с индексом АЕ для разных станций составляют величины в диапазоне значений 0.65-0.75, причем для ст. TRO1 при использовании данных местного магнетометра эта величина возрастает до 0.8. Данные оптических измерений показывают значительную корреляцию со скачками ПЭС - коэффициент корреляции между оптическими данным ст. SKBN и скачками

Методически ясно, что для описания локальной динамики в целом скоротечной суббури лучше пользоваться местными, а не усредненными данными, на основе которых рассчитываются различные геомагнитные индексы. Так, для других станций использование данных магнетометра в Тромсе также увеличивает корреляцию локально измеренного магнитного поля со сбоями параметров сигналов и наблюдаемыми скачками ПЭС.

ПЭС достигает около 0.9.

#### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за предоставленные данные о GPS наблюдениях IGS (http://www.igs.org/). Данные о межпланетном магнитном поле предоставлены сервисом OMNI: (https://omniweb.gsfc.nasa.gov), данные о магнитном индексе AE доступны по адресу: (http://

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 60 № 6 2020

wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html). Авторы выражают признательность рецензенту за обсуждение и полезные замечания.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Создание алгоритмов для вычисления сбоев навигационных сигналов системы глобального позиционирования выполнен В.И. Захаровым в рамках гос. задания Московского государственного университета (N 01200408544) и поддержана Российским фондом фундаментальных исследований грант № 19-05-00941. Комплексный анализ геофизической обстановки во время рассмотренной суббури выполнен А.А. Чернышовым в рамках гос. задания Института космических исследований Российской академии наук (тема "Плазма").

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 349 с. 2014.

– Захаров В.И., Зиенко А.С., Куницын В.Е. Распространение радиосигналов GPS при различной солнечной активности // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 13. № 8. С. 51–57. 2008.

– Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Пронин В.Е. Статистический критерий для определения уровня сбоев полной электронной концентрации по данным GPS наблюдений // Ученые записки Физ. Ф ак. МГУ. № 1. С. 171901-1–171901-9. 2017.

– Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах // Космич. исслед. Т. 54. № 1. С. 1–11. 2016.

https://doi.org/10.1134/S0010952516010147

– Петрукович А.А., Могилевский М.М., Чернышов А.А., Шкляр Д.Р. Некоторые аспекты магнитосферно-ионосферных связей // Успехи физических наук. Т. 185. № 6. С. 649–654. 2015.

https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201506i.0649

– Чернышов А.А., Ильясов А.А., Могилевский М.М., Головчанская И.В., Козелов Б.В. Влияние неоднородностей концентрации плазмы и электрического поля на генерацию электростатического шума в авроральной зоне // Физика плазмы. Т. 41. № 3. С. 277–285. 2015. https://doi.org/10.1134/S1063780X15030010

– Чернышов А.А., Ильясов А.А., Могилевский М.М., Головчанская И.В., Козелов Б.В. Особенности возбуждения волн ионно-акустического типа в высокоширотной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 3. С. 333–342. 2017.

https://doi.org/10.7868/S001679401703004X

– Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Ясюкевич А.С., Воейков С.В., Захаров В.И., Перевалова Н.П., Титков Н.Н. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. № 1. C. 88-98. 2017.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-1-88-98

– Ясюкевич Ю.В., Перевалова Н.П., Едемский И.К., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио-и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: Изд-во ИГУ. 271 с. 2013.

Aarons J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes. // J. Geophys. Res. 102(A8):17219-17231. 1997.

# https://doi.org/10.1029/97JA01118

- Aarons J., Lin B.J. Development of high latitude phase fluctuations during the January 10, April 10-11, and May 15, 1997 magnetic storms // J. Atmos. Solar. Terr. Phys. V. 61. P. 309–327. 1999.

https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00131-X

- Afraimovich E.L., Lesvuta O.S., Ushakov I.I., Voevkov V.S. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals. // Ann. Geophys. V. 45. P. 55-71. 2002.

https://doi.org/10.4401/ag-3494

- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V. et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. // JSWSC. № 3. V. 27. A27. 2013.

https://doi.org/10.1051/swsc/2013049

- Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, superstorms, and their impacts on GPS-based navigation systems. // Space Weather. № 12. V. 7. P. 508–525. 2014.

https://doi.org/10.1002/2014SW001072

Bastos L., Landau H. Fixing cycle slips in dual-frequency kinematic GPS-applications using Kalman filtering. // Manuscripta Geodaetica. V. 13. № 4. P. 249-256. 1988.

Basu S., MacKenzie E., Whitney H. Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap // Radio Sci. V. 20. № 3. P. 347-356. 1985.

- Chernyshov A., Kozelov B., Mogilevsky M. Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // J. Atmos. Solar Terr. Phys. № 161. P. 127–133. 2017. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.013

- Demyanov V.V., Yasyukevich Y.V., Jin S. Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance // Earth Planet. Sci. "Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applica-tions", IntechOpen. P. 177–222. 2013. https://doi.org/10.5772/54568

- Frernouw E.J., Secan J.A., Lansinger J.M. Spectral behavior of phase scintillation in the night time auroral region // Radio Sci. V. 20. № 4. P. 923-933. 1985. https://doi.org/10.1029/RS020i004p00923

- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. GPS -Global Positioning System. Theory and practice // Springer, New York. 389 p. 1998.

– Ilyasov A.A., Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V. Inhomogeneities of plasma density and electric field as sources of electrostatic turbulence in the auroral region // Physics of Plasmas V. 22. № 3. P. 032906. 2015.

https://doi.org/10.1063/1.4916125

- IS-GPS-200 Global Positioning Systems Directorate. Systems Engineering and Integration Interface Specification IS-GPS-200. September 5, 2012. http://www.gps.gov/ technical/icwg//IS-GPS-200G.pdf

- Jakowski N., Stankov S., Klaehn D. Operational space weather service for GNSS precise positioning // Ann. Geophys. V. 23. P. 3071-3079. 2005. SRef-ID: 1432-0576/ag/2005-23-3071

- Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: direct comparison. // J. Space Weather and Space Cli-mate. № 4. V. 27. P. A23. 2014. https://doi.org/10.1051/swsc/2014019

- Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. On the collocation of the cusp aurora and the GPS phase scintillation: A statistical study // J. Geophys. Res. (Space Physics) P. 120:9176-9191. 2015.

https://doi.org/10.1002/2015JA021449

Kaplan E.D., Hegarty C.J. Understanding GPS: principles and applications. Artech House, Boston. 723 p. 2005.

- Komjathy A. Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Dep. Geodesy and Geomatics Engineering Tech. Rep. No. 188, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 248 p. 1997.

Komjathy A., Wilson B., Pi X., Akopian V., Dumett M., Iijima B., Verkhoglyadova O., Mannucci A.J. JPL/USC GAIM: On the Impact of Using COSMIC And Ground-Based GPS Measurements To Estimate Ionospheric Parameters // J. Geophys. Res. V. 115(A2). 2010. https://doi.org/10.1029/2009JA014420

- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Engebretson M.J. GPS-TEC response to the substorm onset during April 5, 2010, magnetic storm // GPS Solutions. V. 21. № 3. P. 927-936. 2017.

https://doi.org/10.1007/s10291-016-0581-6

Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // Geophys. Res. Lett. V. 29(14). 2002. https://doi.org/10.1029/2002GL014770

Paschmann G., Haaland S., Treumann R. et al. Auroral plasma physics // Space Sci. Rev. V. 103. № 1-4. P. 1-475. 2002.

https://doi.org/10.1007/978-94-007-1086-3

- Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network.// Geophys. Res. Lett. V. 24. P. 2283-2286. 1997

https://doi.org/10.1029/97GL02273

Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Pokhotelov D., MacDougall J.W., Donovan E., Spanswick E. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum // Ann. Geophys. V. 28. № 6. P. 1307-1316. 2010.

https://doi.org/10.5194/angeo-28-1307-2010

Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance // Earth Planets Space. V. 52. P. 1067-1071. 2000. https://doi.org/10.1186/BF03352332

Van Dierendonck A.J., Klobuchar J., Hua Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency c/a code receivers // Salt Lake City, Utah, USA, Proceedings of ION-GPS-93, P. 1333-1342. 1993.

- Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // IEEE Proc. V. 70. P. 324-360. 1982.