**Проявление флуктуаций навигационных сигналов ассоциированных с полярными сияниями: событие 9 декабря 2020 года**

Шагимуратов И.И., Ефишов И.И., Филатов М.В.

Проведён анализ сцинтилляций GPS сигналов связанных с полярными сияниями, которые наблюдались на обсерватории Ловозеро 9 декабря 2020 года. Показана прямая связь сцинтилляций с дискретными формами полярных сияний. В качестве индикатора сцинтилляций использованы индексы ROT/ROTI. Выявлено пространственно-временное соответствие кратковременных всплесков в вариациях ROT при прохождении GPS сигналов через дискретные формы полярных сияний. Результаты свидетельствуют, что индексы ROT/ROTI, полученные из стандартных 30 сек. GPS наблюдений могут быть использованы в качестве индикатора наличия сияний, в случаях, невозможности их регистрации оптическими средствами.

ассоциируется с формированием во время геомагнитных бурь среднеширотного повышения ионизации SED (Storm Enhanced Density). SEнаблюдается в виде повышения электронной плотности в околополуденные часы [3]. Во время бури под влиянием магнитосферных электрических полей область SED значительно расширяется по широте, что проявляется в дневном увеличении TEC на средних широтах. Повышение может расширяться в солнечном направлении в сторону полюса с формированием по широте узкой полосы, подобно шельфу, струе ‒ SED/Plume. SED рассматривается как база такой струи [4]. SED/Plume ярко проявилась во время рассматриваемой бури 7 ноября 2022 г.

С различными типами ионосферных возмущений в полярной ионосфере и связанных с ними неоднородностей ассоциируются флуктуации/сцинтилляции навигационных сигналов [5-7]. Интенсивные флуктуации регистрировались в области языка во время бури 17 марта 2015 г. [8]. Флуктуации GPS/ГЛОНАСС сигналов приводят к увеличению ошибок позиционирования, нарушению навигации и связи в высоких широтах [9, 10]. Язык может рассматриваться как главный источник сбоев навигационных сигналов в полярной ионосфере. Следовательно, исследования, касающиеся формирования и эволюции TOI, приобретают особую актуальность.

Проявления TOI-структур и их интенсивность зависит от различных геофизических факторов - UT, сезона, долготы, геомагнитных условий. В работе [11] показано, что в минимуме солнечной активности (2009-2010 гг.) TOI-структура практически не наблюдалась на временах 06-12 UT и преобладающие условия для проявления языка приходятся на зиму. С другой стороны, TOI наблюдались в условиях равноденствия, в частности, в марте 2013 и 2015 гг. [12]. Благоприятные условия для формирования SED/TOI складываются в североамериканском секторе. Большинство ранее выполненных исследований касалось именно этого сектора. Позже структуры SED/TOI обнаружены в других долготных секторах [4].

Механизмы формирования SED/TOI-структуры обсуждаются в ряде последних работ и представленных в них публикациях [12-14]. Основными драйверами TEC увеличения считаются электрические поля, нейтральные ветры, эффекты состава. В работе [12] установлено, что SED и TOI являются разными структурами, которые проявляются на разных высотах, а интенсивность и размер TOI растут с высотой. В [13] было установлено, что ветер и изменение нейтрального состава играют важную роль в формировании структуры TOI. В [14] установлено, что электрические поля магнитосферного происхождения являются главным драйвером TOI структуры. Следует отметить, что эти результаты касались сильнейшей бури 20 ноября 2003 г.

Большинство исследований, касающихся анализа SED и TOI, сфокусировано на проявлении этих структур во время сильных геомагнитных возмущений. В данной работе представлен анализ эффектов, которые наблюдались на высоких широтах во время умеренной бури 7 ноября 2022 г. Буря характеризовалась проявлением крупномасштабных структур- SED/Plume и языка ионизации SED/TOI, что является довольно редким событием. Отдельное внимание уделено анализу пространственной структуры, динамики языка и ассоциированных с ним ионосферных неоднородностей. Большинство исследований по высокоширотным флуктуациям трансионосферных сигналов освещалось для сильных геомагнитных возмущений, не касаясь конкретного источника. Анализ этих эффектов, связанных с менее сильными бурями, в свете активного освоения Арктики, является весьма актуальным.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

Для анализа проявления языка ионизации и ассоциированных с ним ионосферных неоднородностей использовались измерения полного электронного содержания (TEC — Тotal Electron Сontent), которые основываются на GPS/ГЛОНАСС наблюдениях мировой сети станций. На их основе формировались карты TEC северного полушария для широт выше 50○N, которые дают представление об эволюции крупномасштабных структур в высокоширотной ионосфере. Детальные характеристики SED/TOI структур были получены по TEC картам, сформированным по данным базы Мадригал ([*http://cedar.openmadrigal.org*](http://cedar.openmadrigal.org/)). Разрешение данных карт 1° × 1° по широте и долготе, временное разрешение 5 минут. Карты базы Мадригал обеспечивают высокое разрешение для регионов, где имеется хорошо развитая сеть GPS/ГЛОНАСС-станций. Но эти карты имеют низкое пространственное покрытие над океанами и, в частности, в евро-азиатском регионе.

Одним из известных средств детектирования и непрерывного мониторинга ионосферных неоднородностей является использование сигналов навигационных спутников. В настоящее время в мире насчитывается большое количество станций, обеспечивающих регулярные стандартные GPS/ГЛОНАСС наблюдения, доступные для всех пользователей. Стандартные измерения позволяют получать данные о ТЕС с 30 сек. интервалом. Наиболее широко используемым индексом TEC-флуктуаций являются параметр ROT (Rate Of TEC change) и индекс интенсивности флуктуаций ROTI [15]. Доступность, широкое повсеместное использование стандартных имерений во многом определило использование данного индекса в рассматриваемой работе.

. Индексы ROT/ ROTI характеризует интенсивность фазовых флуктуаций GPS сигнала и позволяет детектировать наличие ионосферных неоднородностей Единица измерения ROTI — TECU/мин; 1 TECU=1016 электрон/м2. Основные аспекты методики освещены в работе [16, 17]. Индекс рассчитывался на 5 мин интервале для всех видимых станцией спутников, углы возвышений которых превышали 20○. Мы применили дополнительную обработку полученных данных с целью выявления и коррекции фазовых слипов (cycle slips, потеря фазы, «перескок» фазы), а также устранения возможных выпадающих значений. Измерения корректировались на скачки фазы (cycle slips) при их величине более 5 TECU на интервале 30 сек.

ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ

Развитие геомагнитной бури 7 ноября 2022 г. представлено на рис. 1. Последовательно (сверху вниз) показаны: вариации *Bz*-компоненты межпланетного магнитного поля (IMF), давление солнечного ветра (Psw), индекс авроральной активности (AE), геомагнитный индекс Ap, геомагнитный индекс симметричной компоненты кольцевого тока SYM-Hдля 6-8 ноября 2022 г. Основная фаза бури стартовала после 10:30 UT, затем произошло падение индекса SYM-H до значения ~110 нТл (примерно в 17:30 UT), далее последовала фаза восстановления. Индекс геомагнитной активности Ap превышал значение 50  в 21 UT 7 ноября. Отрицательная величина Bz достигала -12,1 нТл в 17 UT; после 18 часов Bz компонента приобрела положительную величину с флуктуацией до 10 нТл. Всплеск авроральной активности регистрировался в интервале 15-23 UT. Эффект SED проявился на начальной стадии фазы восстановления. На рис. 1 штриховкой показан интервал, когда проявлялась SED/TOI структура. Эффект приходился на минимальную величину Bz. Тонкой линией отмечено момент, когда регистрировалась SED/Plume структура.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Высокоширотные эффекты бури*

Для анализа проявления SED/Plume и SED/TOI структур формировались карты TEC для широт выше 50○N. На рис. 2 представлены карты TEC для спокойного дня (6 ноября) и возмущенного дня (7 ноября), когда в соответствующих пространственно- временных секторах были зарегистрированы характерные особенности проявления бури.

На рисунке видно, что по сравнению со спокойным днем пространственно-временная структура ионосферы во время бури претерпела существенные изменения. Структуры SED/Plume и SED/TOI наблюдаются в день бури 7 ноября. На рисунках однозначно видно, что источником формирования структур является среднеширотная дневная ионосфера [1].

Яркое проявление SED/Plume (верхняя панель, справа) регистрировалась в TEC наблюдениях в североамериканском секторе в виде узкого по широте следа повышенной ионизации (шлейфа), простирающегося от средних, к высоким широтам. Источником формирования шлейфа является структура SED, проявляющаяся как буревое повышение электронной концентрации на широтах ~50ºN. Величина электронного содержания в шлейфе была в 2-2.5 раза выше по сравнению с фоном. Основание шлейфа [4] приходится на долготу около 80○W и на широту около 48-50○N. Формирование шлейфа началось около 18 UT (10 LT) и к 22 часам структура распалась. Шлейф простирался в северо-западном направлении до долгот ~145ºW и соответственно до широт ~65ºN. В целом картина развития SED/Plume эффекта схожа с тем, что наблюдалось во время бури 17 марта 2013 г. [18]. Характерно, что обе бури были умеренными по интенсивности. В обоих случаях формировались структуры SED/Plume на стадии активной фазы бури при Bz ~ -10 нТл. Эффект проявился приблизительно в одно и то же время (19-22 UT), хотя и приходился на разные сезоны. Отметим, что для рассматриваемой бури 7 ноября амплитуда SED/Plume была больше, чем во время бури 17 марта 2013 г. Это свидетельствует, что зимние условия более предпочтительны для формирования Plume структуры.

Классическая картина проявления языка ионизации демонстрируется на рис. 2 (нижняя панель, справа). Язык ионизации не наблюдался в спокойный день. Четкое проявление языка отмечалось в возмущенный день 7 ноября. На рисунке видна эволюция структуры SED с формированием SED/Plume и её дальнейшим развитием в TOI. Язык ионизации также формировался на базе SED структуры. Его основание приходилось на долготы около 60○W и широты около 55-60○N, что несколько выше, чем в случае формирования SED/Plume. Старт языка приходился на околополуденное время (после 14 UT). К 15 UT язык регистрировался на долготах ~20ºW, достигнув широт около 80○N.

Как показано в работе [11], наибольшая вероятность проявления SED/TOI приходилось на интервал 15-21 UT. Наблюдения охватывали 2009-2015 годы. В этой работе статистика основывалась на анализе «patches and/or a tongue of ionization (TOI)», без разделения этих структур. Частота проявления структур было максимальным при слабовозмущенных условиях, когда индекс Kp  не превышал  3. Отметим, что для рассматриваемой бури 7 ноября Kp достигал 5. В большей части последних исследований подчеркивается, что язык может формироваться как при низкой, так и при высокой магнитной возмущенности в зависимости от динамики межпланетного магнитного поля (IMF) и особенностей развития конкретной магнитной бури.. Как указывают ряд исследователей, структура SED/Plume не всегда трансформируется в язык. На рис. 2 для бури 7 ноября видно, что до полудня SED/Plume трансформировалась в язык, а после полудня, хотя структура Plume также ярко проявилась но уже без её эволюции в язык.

*Широтно-долготная структура языка ионизации*

Анализ пространственной структуры и динамики языка ионизации представляет интерес для уточнения механизмов формирования и эволюции языка в зависимости от геофизических условий. Пространственная структура TOI может включать различные виды неоднородностей, которые вызывают флуктуации/сцинтилляции навигационных сигналов.

Ионосферные неоднородности ассоциируются с градиентами TEC на внешней границе языка ионизации. Возможными механизмами генерации неоднородностей рассматриваются Кельвин-Гельмгольца нестабильность (KHI) и градиент-дрейфовая нестабильность(GDI). При этом основным механизмом в полярной ионосфере предполагается GDI [19].

На рис. 3 (верхний ряд) показана пространственная структура языка в TEC для 15 UT (время начала его формирования) и 16 UT, когда язык сформировался. После 15 UT повышение TEC, связанное с языком, достигло широт около 80○N и протиралось до долгот 20○W. К 16 часам язык регистрировался на долготах 30○E при его перемещении через полярную шапку в вечерний сектор. На долготах 60-40○W высокие значения TEC(~50 TECU) наблюдаются на широтах 50-60○N- SED области, являющаяся источником для формирования языка. На долготах менее 30○W структура SED- эффекта исчезает. Широтная структура языка представлена на рисунке на разных долготах в форме широтных профилей (рис. 2, внизу). Очень высокие значения (30-40 TECU) регистрируются на широтах около 80-85○N в области проявления TOI. Интересно отметить, что высокие значения электронного содержания (~25 TECU) сохраняется на долготах меньше 30○E (в европейском секторе). Это подтверждает, что структура языка продолжает сохраняться, но с меньшей величиной TEC. Следует также заметить, что максимум электронного содержания смещался на более низкие широты. Это свидетельствует о том, что конвекция плазмы проистекала до широт около 70○N.

На рисунке видно, что в окрестности языка наблюдаются значительные градиенты TEC. Отметим, что градиенты демонстрируют большой разброс: максимальные значения достигали 30-40 TECU/градус. Такие градиенты характерны на полярной стенке SED структуры [20]. Малые значения TEC наблюдаются на широтах 65-75○N. Существенно, что в этой области величина градиентов на порядок меньше, чем на широтах 80○N в области TOI. В области больших градиентов генерируются различных масштабов неоднородности [21]. Такими областями являются граница SED и передний край языка ионизации, как это можно видеть ниже на рис. 4.

*TEC флуктуации и язык ионизации*

Анализ TEC-флуктуаций на высоких широтах представлен во многих работах. Большая их часть касается анализа сильных магнитных бурь, в частности, бури 17 марта 2015 года, без конкретизации пространственных структур, с которыми эти флуктуации связаны. Во время возмущений TEC флуктуации существенно усиливаются в области полярной кромки стенки SED-структуры и в области каспа. В полярной шапке интенсивность флуктуаций усиливается при фрагментации TOI в polar patches [5]. Проявление ионосферных неоднородностей в языке наблюдалось во время бури 17 марта 2015 года[8]. Язык в TEC флуктуациях выявлен по измерениям индексов ROT/ROTI на основе наземных и низко-орбитных GPS наблюдений[8]. С освоением арктического региона исследования флуктуаций навигационных сигналов (TEC-флуктуаций) на высоких широтах представляют большой интерес, являются важными и актуальными. Флуктуации могут вызывать сбои навигационных сигналов, срывы, скачки, и в конечном итоге это приводит к существенному увеличению ошибок позиционирования [9.22].

В качестве индикатора проявления TEC-флуктуаций нами были использованы индексы ROT/ROTI. Как отмечалось, преимущество индексов в их простоте и доступности измерений, по которым они рассчитываются. Флуктуации TEC вызывают сцинтилляции навигационных сигналов. Параметр ROT характеризует скорость изменения дифференциальной фазы GPS/GLONASS сигналов, обеспечивая информацию, о соответствующих размерах неоднородностей электронной плотности. ROT вычисляется на 1- минутном интервале. При скорости конвекции плазмы на высоких широтах 100-1000 м/сек размеры неоднородностей оцениваются от нескольких км до 10 км [23]. В работе [19] для возмущения 31 октября 2011 г. по GPS-наблюдениям полярной станции Ny-Еlesund (78.9○N, 11.5ºE) размеры неоднородностей в области TOI были оценены в 3-5 км, при скорости около 550 м/с. Следует отметить, что в отличие от рассматриваемого нами события, TOI наблюдалось в слабо возмущенных условиях. Усиление флуктуаций приходилось в области резких градиентов TEC.

Для детектирования ионосферных неоднородностей мы использовали наблюдения гренландской сети GPS станций. Преимущества этой сети обусловлено тем, что позволяют проводить мониторинг ионосферы на широтах 80-60ºN.

На рис. 4 представлены вариации индекса ROT для всех спутников, видимых над станцией наблюдения (карты пролетов). На каждой панели вертикальная ось обозначает номер наблюдаемого GPS спутника от 1 до 32; горизонтальная ось – время UT. Карты пролетов показаны для полярной станции JWLF, расположенной в полярной ионосфере, авроральной станции RINK и субавроральной станции SENU. Наибольшая интенсивность флуктуаций наблюдается на станции JWLF, которая характеризует проявление неоднородностей в области TOI. Причем, максимум флуктуаций наблюдается в 15-17 UT, когда явно проявилась структура языка ионизации, на долготах ~45ºW. Так, для спутника № 21 (здесь не показано) величина ROT около 16 UT достигала более 8 TECU/min. Для сравнения заметим, что величина ROT после 17 UT, когда TOI структура уже не проявлялась, составляла не более 1 TECU/мин. Характерно, что всплеск флуктуаций наблюдался в узком диапазоне широт 85-88○N.

На рис. 4 (панель *а*) показана широтная зависимость интенсивности флуктуаций (ROTI), полученная по GPS наблюдениям гренландской сети станций. Рисунок представлен для времени 16 UT, когда язык сформировался. Здесь выделяется максимум на широтах около 60○N, и более выраженный максимум на широтах около 85○N. Интенсификация неоднородностей на широтах около 60○N приходится на полярную границу SED-структуры, где, как отмечалось, могут формироваться ионосферные неоднородности. Второй максимум ассоциируется с проявлением языка ионизации. Интенсивность флуктуаций более чем в 2 раза выше в области языка, чем на широтах ~70○N. Характер поведения широтного профиля интенсивности флуктуаций очень хорошо согласуются с широтным профилем полного электронного содержания (рис. 3). В широтном профиле ROTI усиление флуктуаций приходятся в области максимальных градиентов TEC, на широтах ~60○N и на широтах 80- 85○N.

На рис. 4 (панель *б*) детально показана пространственная структура языка в измерениях TEC, охватывающая широты 50-90○N (слева), а также структура интенсивности ионосферных неоднородностей - ROTI (справа). Картина ясно показывает непосредственную связь проявления ионосферных неоднородностей с языком ионизации в структуре TEC. Интенсивность флуктуаций в языке выше более чем в 2,5 раза по сравнению с интенсивностью вне его.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время бури 7 ноября 2022 г. в послеполуденные часы в области полярной шапки зарегистрировано весьма значительное повышение полного электронного содержания (TEC), ассоциированное с языком ионизации (TOI). Показано, что формирование языка происходит как эволюция SED/Plume-структуры при конвекции плазмы со средних широт через касп в полярную шапку. Основание SED/Plume языка приходилось на долготы около 60○W и на широты около 60○N. Язык ярко проявился на широтах 85○N и простирался до долгот более 20ºE -в ночную ионосферу. При этом он наблюдался в течение 15-17 UT. В области языка градиенты ионизации достигали 30-40 TECU/град. Столь значительные градиенты ассоциировалась c генерацией интенсивных ионосферных неоднородностей. Для детектирования неоднородностей использованы ROT/ROTI измерения. В широтном ходе проявления неоднородностей выявлены два характерных максимума. Один из них приходился на широты около 60ºN, ассоциированный с высокими градиентами TEC в области формирования SED. Второй максимум, существенно больший, наблюдался в области языка на широтах около 80-85ºN, где также регистрировались большие градиенты TEC. Пространственная структура языка в TEC и структура ионосферных неоднородностей ROT/ROTI весьма подобны, что свидетельствует об их прямой связи.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Foster J.C*. // JGR Space Physics. 1993. V. 98. No. A2. P. 1675.
2. *Foster J.C., Coster A.J., Erickson P.J. et al*. // JGR Space Physics. 2005. V. 110. No. A9. Art. No. A09S31.
3. *Heelis R.A., Sojka J.J., David M., Schunk R.W*. // JGR Space Physics. 2009. V. 114. No. 3. Art. No. A03315.
4. *Coster A.J., Colerico M.J., Foster J.C. et al*. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. No. 18. Art. No. L18105.
5. *Jin Y., Moen I., Oksavik K., et al*. // J. Space Weather Space Clim. 2017. Art. No. A23.
6. *Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В*. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 428; *Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W*. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 348.
7. *Белаховский В.Б., Будников П.А., Калишин А.C. и др*. // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 3. С. 58; *Belakhovsky V.B., Budnikov P.A., Kalishin A.S. et al*. // Solar-Terrestrial Physics. 2023. V. 9. No. 3. P. 54.
8. *Cherniak Iu., Zakharenkova I., Redmon R*. // Space Weather. 2015. V. 13. No. 3. P. 585.
9. *Fabbro V., Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L., Rougeriel S*. // J. Space Weather Space Clim. 2021. V. 11. No. 43.
10. Ш*агимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др*. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 433; *Shagimuratov I.I., Filatov M.V., Efishov I.I. et al*. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 318.
11. *David M., Sojka J.J., Schunk R.W., Coster A.J*. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. No. 6. P. 2422.
12. *Liu J., Wang W., Burns A. et al*. // JGR Space Physics. 2016. V. 121. No. 1. P. 727.
13. *Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V. et al*. // Space Weather. 2019. V. 17. No. 3. P. 1073.
14. *Pokhotelov D., Mitchell C.N., Spencer P.S.J. et al*. // JGR Space Physics. 2008. V. 113. No. A3. Art. No. A00A16.
15. *Pi X., Mannucci A.J, Valant-Spaight B. et al.* // Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, April 2013. 2013. P. 752.
16. *Shagimuratov I.I., Krankowski A., Efishov I.I. et al*. // Earth Planets Space. 2012. V. 64. No. 6. P. 521.
17. *Захаренкова И.Е., Черняк Ю.В., Шагимуратов И.И., Клименко М.В*. // *Геомагн. и аэрон. 2018. Т. 58 № 1. С. 76*; *Zakharenkova I.E., Cherniak I.V., Shagimuratov I.I,. Klimenko M.V*. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 1. P. 70.
18. *Zhai C., Lu G., Yao Y. et al*. // JGR Space Physics. 2020. V. 125. No. 11. Art. No. e2020JA028257
19. *Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D. et al*. // JGR Space Physics. 2014. V. 119. No. 10. P. 8624.
20. *Vo H.B., Foster J.C*. // JGR Space Physics. 2001. V. 106. No. A10. P. 21555.
21. *Sun Y.-Y., Matsuo T., Araujo-Pradere E.A., Liu J.-Y*. // JGR Space Physics. 2013. V. 118. No. 5. P. 2478
22. Ш*агимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др*. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 12. С.310. *Shagimuratov I.I., Filatov M.V., Efishov I.I. et al*. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 318.
23. *Alfonsi L., Spogli L., de Franceschi G. et al*. // Radio Sci. 2011. V. 46. No. 3. Art. No. RS0D05.