

ВЕРОЯТНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПУЗЫРЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕСЯЦА ГОДА

© 2023 г. Л. Н. Сидорова*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

**e-mail: lsid@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 03.10.2022 г.

После доработки 22.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Исследованы вариации вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей в зависимости от месяца года. Для этого использованы данные, полученные на борту спутника ISS-b (~972–1220 км) в районе средних широт $\pm(25^\circ-55^\circ)$ DIPLAT обоих полушарий за полтора года наблюдений (август 1978–декабрь 1979 гг.). Проведен сравнительный анализ исследуемой характеристики с месячными вариациями скорости меридионального ветра. Для этого привлечены данные о скорости ветра, рассчитанные по модели горизонтальных ветров HWM14. 1. Выявлено, что максимальные значения вероятности наблюдения плазменных пузырей каждый раз достигаются в период местной зимы: в декабре–феврале в Северном полушарии (~19%), в июне–августе в Южном полушарии (~29%). Минимальные значения достигаются местным летом: в июне–августе в Северном полушарии (~3%), в декабре–феврале в Южном полушарии (~4%). Как результат, в периоды солнцестояний имеет место асимметричное развитие пузырей относительно геомагнитного экватора. 2. Выявлено, что относительное равенство значений вероятности на гистограммах разных полушарий достигается в периоды равноденствий. Как результат, в эти периоды имеет место почти симметричное “расплывание” пузырей относительно экватора. 3. Выявлено, что максимальные значения вероятности наблюдения плазменных пузырей в каждом полушарии достигаются в период местной зимы, когда там развиваются меридиональные ветры, способствующие опусканию плазмы пузыря и, соответственно, “расплыванию” пузыря вдоль силовой трубки. Минимальные значения вероятности в каждом полушарии достигаются в сезон местного лета, когда развивающийся там меридиональный ветер благоприятствует подъему плазмы пузыря и тормозит его “расплывание”.

DOI: 10.31857/S0016794022600533, EDN: DLENDL

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что экваториальные плазменные пузыри (equatorial plasma bubble, EPB) формируются после захода Солнца под влиянием плазменной неустойчивости Релея–Тейлора (R–T), развивающейся на высотах основания F -области (~300–400 км). (Предзаходный рост электрических полей вызывает всплеск вертикального дрейфа экваториальной плазмы ($\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ дрейф). При этом основание F -области смещается к высотам ~300–400 км, а максимум F -области – к ~500 км и более (см., например, [Huang and Kelley, 1996]). Для формирования EPB помимо R–T неустойчивости требуется еще наличие затравочных возмущений плазмы. Затравочные возмущения после захода Солнца, т.е. с развитием вечернего всплеска $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ дрейфа, начинают эволюционировать и оформляться в EPB. На высотах основания F -области (~300–400 км), где EPB только формируются, они регистрируются пре-

имущественно над экватором. При подъеме пузыря на большие высоты под влиянием амбиполярной диффузии происходит его “расплывание” вдоль магнитных силовых трубок. Как результат, пузырь приобретает бананообразный вид. В таком виде пузырь может быть зарегистрирован не только в экваториальных, но и в низких широтах и даже на средних широтах разных полушарий (см. рис. 5 в работе [Сидорова, 2021]).

При наблюдении EPB оптическими методами на высотах основания F -области или несколько выше, как правило, обнаруживалось строго симметричное “расплывание” EPB относительно геомагнитного экватора [Otsuka et al., 2002; Sobral et al., 2009]. Иногда эту симметрию выявляли нарушенной [Sau et al., 2017].

Однако при трансионосферном зондировании EPB с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) картина их “расплывания” кардинально менялась. Например,

согласно Barros et al. [2022], асимметрия развития EPB относительно экватора обнаруживалась в 30% случаев. При этом использовались данные полного электронного содержания (Total Electron Content, TEC), собранные за 4 года наблюдений (2012–2016 гг.) над сопряженными точками приэкваториального региона Бразилии. Причем гистограммы вероятности наблюдения EPB, выявленных в разных полушариях, показывали четкую сезонную зависимость.

Следует отметить, что наземные радарные и оптические методы позволяют наблюдать эволюцию и динамику отдельных EPB на высотах вблизи основания F -области. (Пузыри на этих высотах еще относительно невелики.) Более того, имеются техники наблюдений, позволяющие наблюдать отдельные EPB целиком и в динамике их развития на больших высотах, т.е. там, где пузыри достигают крупных и очень крупных размеров. Например, упомянутое трансионосферное зондирование EPB с помощью ГНСС или уникальная техника пространственного сканирования ионосферы в ультрафиолетовом диапазоне. Так, хорошо известны координированные наблюдения EPB с помощью УФ-спектрометров GUVI (Global Ultraviolet Imager) и SSUSI (Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager), установленных на спутниках TIMED (~625 км) и DMSD (~830 км) [Comberiate and Paxton, 2010]. Однако, указанные методы, позволяющие визуализировать EPB на больших ионосферных высотах, являются технически сложными и дорогими.

Более распространенными являются методики наблюдения EPB в ионной и электронной концентрации с помощью приборов, установленных на борту спутников. Они позволяют осуществлять наиболее продолжительные и устойчивые наблюдения EPB на высотах верхней ионосферы. Правда, эти наблюдения не позволяют видеть пузырь целиком, его можно наблюдать только фрагментарно. (Он обнаруживается как одномерная структура вдоль или поперек орбиты спутника. На высотах верхней ионосферы пузырь может достигать гигантских размеров – сотен километров в поперечном и нескольких тысяч километров в продольном сечениях.) Развитие отдельных EPB может быть отслежено лишь на спутниках с экваториальными орбитами или орбитами малого наклонения (например, C/NOFS, наклонение ~13°). Иные спутники по причине межвиткового сдвига регистрируют уже новый пузырь. В этих случаях описание динамики “расплывания” EPB вдоль магнитной силовой трубки возможно только в статистическом смысле, т.е. в терминах вероятности наблюдения EPB (P_{EPB}) по широте в разных полушариях.

Так, по данным спутника ROCSAT-1, полученным на высоте ~600 км, выявлено, что помимо

экваториального максимума P_{EPB} в обоих полушариях начинают развиваться дополнительные среднеширотные максимумы P_{EPB} [Su et al., 2006]. Причем величины среднеширотных максимумов разных полушарий имеют четкую привязку к сезону наблюдения. В периоды равноденствий они приблизительно равны между собой, а в периоды солнцестояний доминирует максимум зимнего полушария.

Эта тенденция окончательно оформляется на широтных гистограммах, полученных по данным более высокоорбитального спутника ISS-b (~972–1220 км) [Сидорова, 2021]. EPB на этих высотах обнаруживаются не традиционно (по пониженной электронной или суммарной ионной плотности), а как области с пониженной концентрацией ионов гелия (He^+). По наблюдениям, подкрепленным оценками [Сидорова и Филиппов, 2014], EPB на этих высотах существуют продолжительное время и выявляются чаще всего в регионе средних широт [Sidorova and Filippov, 2012, 2014; Сидорова и Филиппов, 2013]. Считается, что за формирование среднеширотных максимумов P_{EPB} ответственны EPB, достигающие своих потолочных высот [Сидорова, 2021]. Это те EPB, которые утратили способность к дальнейшему подъему, остановились на силовой трубке, соответствующей их потолочной высоте, и застыли там на несколько часов. Они имеют тенденцию накапливаться. Накопление EPB отражается на широтных гистограммах в виде появления и постепенного роста среднеширотных максимумов P_{EPB} . И, аналогично результатам Su et al. [2006] (ROCSAT-1, ~600 км), величины максимумов, выявленных в разных полушариях, оказываются приблизительно равными в периоды равноденствий. А для периодов солнцестояний выявляется доминирующий максимум в зимнем полушарии [Сидорова, 2021]. Последнее означает, что в зависимости от сезона в разных полушариях создаются более (или менее) благоприятные условия для развития (“расплывания”) EPB вдоль магнитных силовых трубок. Так, в сезоны равноденствий “расплывание” EPB относительно геомагнитного экватора приблизительно симметричное, а в периоды солнцестояний – асимметричное.

Итак, на настоящий момент достигнуто понимание того, что на высотах верхней ионосферы сезонная изменчивость в “расплывании” структур EPB относительно геомагнитного экватора проявляется наиболее ярко. В приведенных выше работах для анализа каждого из сезонов использовались либо отдельные характерные месяцы наблюдений, либо трехмесячные интервалы наблюдений. Однако для решения ряда проблем, связанных с прогнозом устойчивой связи навигационных систем, зачастую требуются более детальная информация. Например, информация об

изменчивости обсуждаемой характеристики от месяца к месяцу.

Согласно многочисленным исследованиям, в числе наиболее возможных причин развития меридионально-асимметричных структур ЕРВ называют влияние термосферных ветров. А именно, полагают, что за асимметричность ЕРВ ответственны трансэкваториальные меридиональные ветры [Maquyama, 1988; Abdu, 2001; Maquyama et al., 2009; Krall et al., 2009, 2013; Huba and Krall, 2013; Rodriguez-Zuluaga and Stolle, 2019]. Если это так, то крайне важно при исследовании месячных вариаций $P_{ЕРВ}$ провести их сравнение с аналогичными вариациями скорости горизонтального меридионального ветра.

В настоящей работе исследованы вариации $P_{ЕРВ}$ в зависимости от месяца года. Рассмотрены ЕРВ, регистрируемые в разных полушариях в районе средних широт. Для выполнения поставленной задачи использованы данные наблюдений ЕРВ, регистрируемые на борту спутника ISS-b в разные месяцы года. Проведен сравнительный анализ указанной характеристики с месячными вариациями скорости горизонтального меридионального ветра. Поскольку измерения меридионального термосферного ветра до сих пор являются довольно редкими и разрозненными [Gasperini et al., 2016], то для анализа привлечены данные о скорости ветра, рассчитанные по модели горизонтальных ветров HWM14 [Drob et al., 2015].

2. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Экваториальные плазменные пузыри (ЕРВ), спутник ISS-b

Гистограммы вероятности наблюдения ЕРВ ($P_{ЕРВ}$) в зависимости от месяца года были получены по данным спутника ISS-b [RRL, 1983, 1985]. Спутник ISS-b имел квазикруговую орбиту с наклонением $\sim 70^\circ$, покрывающую высоты верхней ионосферы (~ 972 – 1220 км). Данные регистрировались в течение полутора лет (август 1978–декабрь 1979 г.) периода высокой солнечной активности ($F10.7 \sim 150$ – 220).

Для построения гистограмм использовались наблюдения плазменных областей с пониженной концентрацией He^+ . Согласно работам [Sidorova and Filippov, 2012; Сидорова и Филиппов, 2013], эти области, регистрируемые на высотах верхней ионосферы, можно интерпретировать как плазменные пузыри экваториального происхождения, т.е. как ЕРВ. Для построения использовались лишь только те структуры ЕРВ, чья концентрация в ионах He^+ уменьшалась в полтора раза и более по отношению к фону.

Вариации $P_{ЕРВ}$ были рассчитаны отдельно для Южного и Северного полушария (рис. 1а, 2а).

Для каждого месяца величина $P_{ЕРВ}$ рассчитывалась как медианное значение совокупности частот наблюдения ЕРВ в каждой полосе шириной 5° среднеширотного интервала наблюдений ЕРВ $\pm(25^\circ$ – $55^\circ)$ DIPLAT. Размах среднеширотного интервала определялся по результатам исследования широтных распределений ЕРВ в разные сезоны наблюдений [Сидорова, 2021]. Рассматривались только те случаи ЕРВ, которые регистрировались в магнито-спокойные и умеренно-возмущенные периоды ($Kp \leq 3$). Данные за июль 1979 г. отсутствовали по причине технического сбоя в работе аппаратуры спутника ISS-b [RRL, 1985].

2.2. Меридиональный термосферный ветер, модельные расчеты

Вариации скорости меридионального ветра были рассчитаны по данным эмпирической модели горизонтальных ветров, версия 14 (Horizontal Wind Model 14, HWM14 [Drob et al., 2015]). Рассматривались умеренно-возмущенные геомагнитные условия ($A_p = 8$) периода повышенной солнечной активности ($F10.7 = 180$). Расчет производился для вечернего времени (LT = 20 ч) пятнадцатого числа каждого месяца. Ежемесячные значения скорости меридионального ветра рассчитывались как медианы по всем долготным интервалам шириной 30° GMLON. Рассматривался геомагнитный экватор на термосферной высоте ~ 400 км, которая является характерной для высоты основания F -области.

В модельном расчете меридиональные ветры, дующие с юга (южные ветры), имеют положительные значения скорости, а северные ветры – отрицательные (рис. 1б, 2б).

3. АНАЛИЗ

1. Проведем детальный анализ гистограмм вероятности наблюдения ЕРВ ($P_{ЕРВ}$), построенных в зависимости от месяца года для каждого из полушарий.

Хорошо видно, что в период летнего солнцестояния в Южном зимнем полушарии (рис. 1а) величины $P_{ЕРВ}$ испытывают значительный рост ($\sim 29\%$). И, наоборот, в период зимнего солнцестояния величины $P_{ЕРВ}$ Южного летнего полушария испытывают значительный спад ($\sim 4\%$). Следует отметить, что относительно небольшая выборка данных (полтора года наблюдений) не обеспечивает идеальной гладкости в развитии выявляемой тенденции. Особенно хорошо это заметно по наблюдениям за период с января по август, когда расчет производился по данным лишь одного года наблюдения (1979 г.). Это привело к сильному разбросу значений в вариациях $P_{ЕРВ}$.

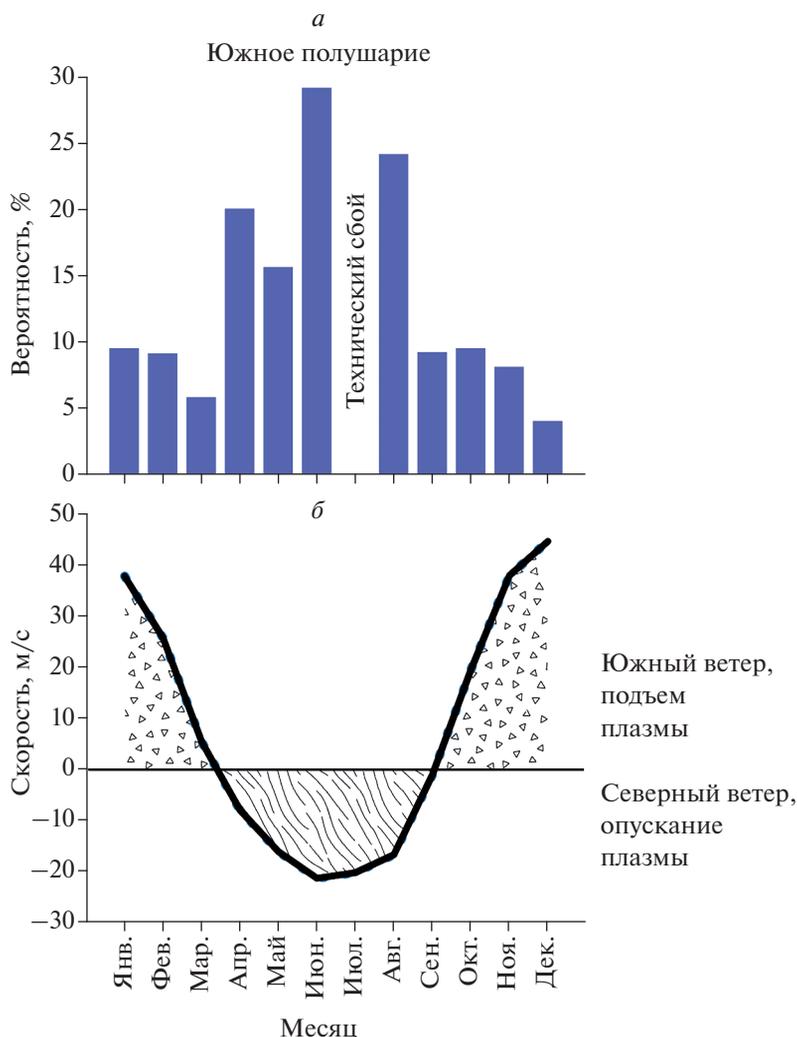


Рис. 1. (а) Вариации P_{EPB} , построенные в зависимости от месяца года для Южного полушария. Ежемесячные значения P_{EPB} являются медианами по среднеширотному интервалу наблюдений $(25^{\circ}–55^{\circ})$ DIPLAT. Данные спутника ISS-b ($\sim 972–1220$ км) за полтора года наблюдений (август 1978–декабрь 1979 гг.). (б) Месячные модельные вариации скорости меридионального термосферного ветра, рассчитанные над экватором на высоте ~ 400 км (черная сплошная кривая). Расчет по модели горизонтальных ветров HWM14 [Drob et al., 2015]. Положительные значения скорости соответствуют южным ветрам, отрицательные – северным. Области, заполненные треугольниками и штриховыми линиями, соответствуют областям подъема и опускания плазмы в Южном полушарии.

Однако, в период с августа по декабрь, когда для расчета использовались данные двух лет наблюдений (1978–1979 гг.), выявляемая тенденция проявилась наиболее четко.

Если рассматривать гистограмму, полученную для Северного полушария (рис. 2а), то хорошо видно, что значения P_{EPB} максимальны ($\sim 19\%$) в зимние месяцы (зимнее солнцестояние), а минимальны P_{EPB} ($\sim 3\%$) в период летнего солнцестояния. Аналогично, как и для Южного полушария, эта тенденция развивается наиболее гладко в период с августа по декабрь, когда расчеты производились за оба года наблюдений (1978–1979 гг.).

Если сравнивать гистограммы разных полушарий (рис. 1а, 2а) периодов равноденствия, то по указанной выше причине разумно ограничиться обзором только одного периода – периода осеннего равноденствия. Хорошо видно, что значения P_{EPB} в том и другом полушарии покрывают один и тот же диапазон вероятностей. А именно, $\sim 7–10\%$ – в Южном полушарии и чуть более узкий ($\sim 8–10\%$) – в Северном полушарии. Иными словами, значения P_{EPB} в разных полушариях этого периода практически одинаковы.

2. Проведем сравнительный анализ месячных вариаций P_{EPB} , полученных для разных полуша-

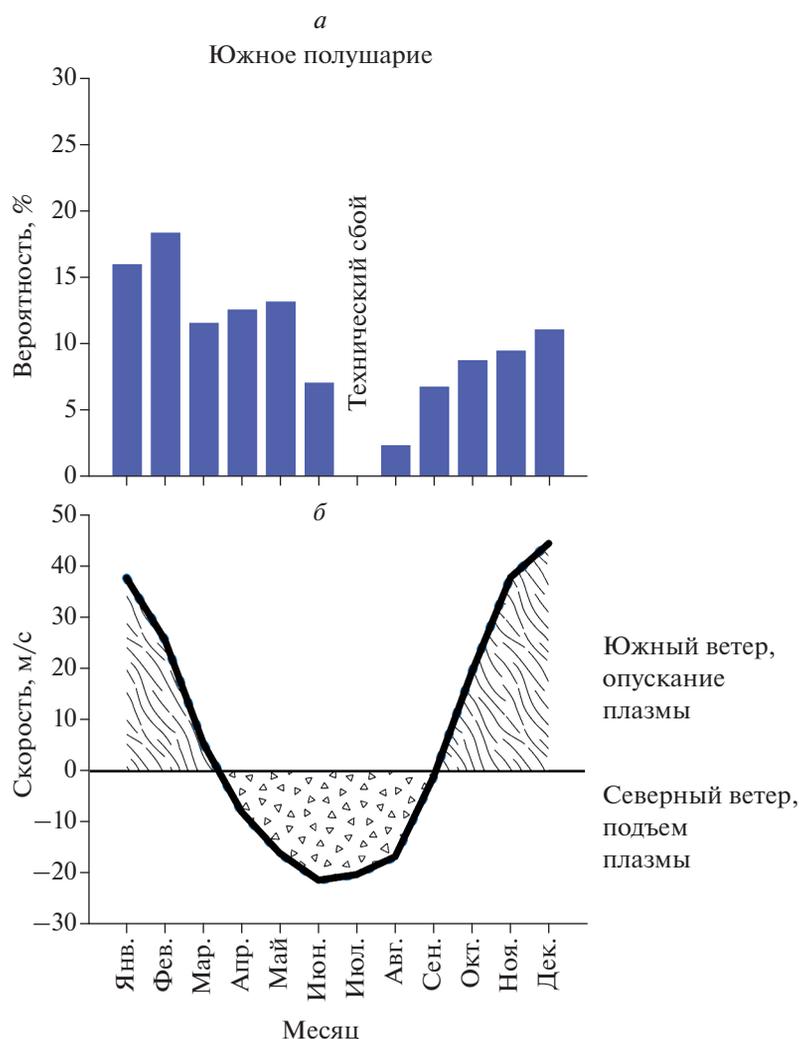


Рис. 2. (а) Вариации P_{EPB} , построенные в зависимости от месяца года для Северного полушария. Ежемесячные значения P_{EPB} являются медианами по среднеширотному интервалу наблюдений 25° – 55° DIPLAT. (б) Месячные модельные вариации скорости меридионального термосферного ветра, рассчитанные над экватором на высоте ~ 400 км (черная сплошная кривая). Области, заполненные треугольниками и штриховыми линиями, соответствуют областям подъема и опускания плазмы в Северном полушарии.

рий, и вариаций скорости меридионального ветра, рассчитанных по данным модели HWM14 на широте экватора (рисунки 1б, 2б).

Из сравнения видно, что летом в Северном полушарии (рис. 2а, 2б) при развитии северных ветров наблюдается катастрофичное убывание вероятности наблюдения EPB. А в Южном полушарии (рис. 1а, 1б) при росте северных ветров, наоборот, наблюдается максимальный рост значений P_{EPB} .

Обратная ситуация развивается зимой, когда доминирует южный меридиональный ветер. В Южном полушарии при развитии южных ветров наблюдается значительное убывание значений P_{EPB} (рис. 1а, 1б). А в Северном полушарии,

наоборот, виден значительный рост значений P_{EPB} (рис. 2а, 2б).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

1. Из сравнения гистограмм P_{EPB} разных полушарий (рис. 1а, 2а) хорошо видно, что максимальные значения в вариациях P_{EPB} каждый раз достигаются в период местной зимы: в декабре–феврале в Северном полушарии ($\sim 19\%$), в июне–августе в Южном полушарии ($\sim 29\%$). Соответственно, минимальные значения P_{EPB} достигаются местным летом: в июне–августе в Северном полушарии ($\sim 3\%$), в декабре–феврале в Южном полушарии ($\sim 4\%$). Очевидно, что в эти периоды

(периоды солнцестояний) имеет место асимметричное развитие плазменных пузырей относительно геомагнитного экватора.

Кроме того выявлено, что относительные равенства значений P_{EPB} на гистограммах разных полушарий достигаются в периоды равноденствий. Особенно хорошо это заметно по данным периода осеннего равноденствия (сентябрь–ноябрь), полученным за два года наблюдений (1978–1979 гг.). Очевидно, что в периоды равноденствий имеет место более или менее симметричное “расплавание” EPB относительно геомагнитного экватора.

2. Как указывалось во Введении, в периоды равноденствий величины среднеширотных максимумов P_{EPB} , выявленные в разных полушариях по данным спутника ROCSAT-1 (~600 км), приблизительно равны между собой [Su et al., 2006]. А в периоды солнцестояний доминирует максимум зимнего полушария. Заметим, что и по данным спутника ISS-b (~972–1220 км) получается аналогичная картина. Очевидно, что различия в методиках измерений и высотах наблюдений не позволяют провести количественный сравнительный анализ указанных результатов. Однако качественное сравнение вполне уместно. И оно свидетельствует о хорошем подобии.

С некоторыми оговорками можно провести сравнение полученных результатов с данными наблюдений EPB над сопряженными точками приэкваториальных широт бразильского региона [Varros et al., 2022]. И опять же, как и ранее, справедливо говорить только лишь о качественном сопоставлении. Ведь наши результаты получены по спутниковым данным, усредненным по всем долготам, а результаты Varros et al. [2022] отражают картину развития EPB только в одном долготном регионе. Согласно последним, значения P_{EPB} над бразильскими долготами также максимальны зимой в Северном полушарии и минимальны в Южном полушарии, где в это время лето (рис. 4–5 указанной работы). К периодам равноденствий эти значения также достигают относительного равенства. Картина подобия с нашими результатами нарушается только в период летнего солнцестояния. Однако этот факт легко объясняется тем, что над Бразилией в этот сезон EPB вообще не регистрируются (рис. 3 указанной работы). Существует мнение (см., например, [Kil et al., 2009]), что генерация EPB в этот период сильно затруднена из-за особенностей долготного хода магнитного поля в этом регионе.

3. Обсудим причины асимметричного развития EPB относительно экватора и связь такого развития с сезонными условиями.

Как уже указывалось ранее, считается, что трансэкваториальные меридиональные ветры оказывают значительное влияние на генерацию и

развитие EPB. В частности, полагают, что они ответственны за асимметричность развития EPB.

Важно отметить, что ветровое влияние на ионосферную плазму, в частности на генерацию и эволюцию EPB, сильно ограничено высотным диапазоном. Оно наиболее эффективно вблизи высот генерации EPB и значительно ослабевает при подъеме EPB до их предельных (потолочных) высот. Это связано со значительным падением концентрации нейтральных частиц с ростом высоты. На высотах верхней ионосферы, где их концентрация крайне мала, влияние ветра становится и вовсе ничтожным. (Напомним, что до высот ~500 км первостепенную роль еще играют ион-нейтральные соударения, выше начинают преобладать ион-ионные соударения [Брюнелли и Намгаладзе, 1998].)

Ветровое влияние на EPB можно условно поделить на (а) *непрямое* и (б) *прямое*.

(а) Полагают (см., например, [Abdu, 2001]), что меридиональный ветер может оказывать *непрямое* влияние на экваториальные плазменные пузыри в период их генерации. Оно осуществляется посредством воздействия ветра на темпы роста R–T-неустойчивости и интегральную поперечную проводимость силовой трубки, контролирующую нелинейное развитие EPB [Abdu, 2001]. В ряде работ (см., например, [Krall et al., 2009, 2013; Rodriguez-Zuluaga and Stolle, 2019]) приводятся теоретические оценки и наблюдения, которые поддерживают идею Maquyama [1988] о стабилизирующем факторе влияния меридионального ветра на генерацию EPB. Согласно этой идее, усиление меридиональных ветров приводит к подавлению темпов роста R–T-неустойчивости и последующему подавлению генерации EPB. С другой стороны, имеются исследования (см., например, [Mendillo et al., 2001; Devasia et al., 2002; Jyoti et al., 2004; Huba and Krall, 2013; Сидорова, 2022]), доказывающие обратное. Иными словами, на настоящий момент механизм *непрямого* влияния меридионального ветра на EPB до конца не изучен и вызывает многочисленные споры. Указав на эти проблемы, оставим его без детального обсуждения.

(б) *Прямое* влияние меридиональный ветер оказывает на плазму пузырей в период их вертикального подъема и “расплавления” вдоль магнитных силовых трубок.

Для объяснения используем модельное представление о влиянии меридионального ветра на ионосферную плазму, приведенное в работе [Kelley, 2002] (модель “фен, клин и шарик для пинг-понга”). Согласно этой модели, поток воздуха от фена — это меридиональный ветер, клин — высотно-широтный ход магнитной силовой трубки, а шарик — ионосферная плазма. Легко заметить, что в летний сезон, когда будет развит северный

ветер, в Северном полушарии он будет приводить к подъему плазмы вдоль магнитных силовых трубок, а в Южном полушарии, наоборот, — к ее опусканию.

Известно, что ЕРВ (в нелинейную фазу своего развития) устремляются на большие высоты гораздо быстрее, чем окружающая плазменная масса [Tsunoda et al., 1982]. ЕРВ по мере подъема на высоты верхней ионосферы под влиянием процессов амбиполярной диффузии начинают “расплываться” (“растягиваться”) вдоль магнитных силовых трубок. Меридиональная ветровая компонента, ориентированная вдоль магнитного поля, приводит либо к усилению процессов диффузионного “расплывания” заряженных частиц вдоль магнитной силовой трубки (или ее части) либо к торможению этих процессов. Например, если меридиональный ветер приводит к опусканию плазмы по силовой трубке, то он благоприятствует “расплыванию” пузыря. Если же ветер приводит к подъему плазмы вдоль трубки, то он препятствует “расплыванию” пузыря.

Пузыри, подвергшиеся такому влиянию на старте их вертикального подъема (высоты основания F -области), будут нести его как отпечаток при дальнейшем подъеме на большие ионосферные высоты. Как результат, это может отразиться на конечных размерах “растянувшихся” ЕРВ. При благоприятном режиме пузырь будет испытывать максимальное “растягивание” вдоль магнитной силовой трубки (или ее части) и далее при подъеме на высоты верхней ионосферы становится более заметным на низких широтах и части средних широт. Последнее увеличит вероятность наблюдений ЕРВ на этих широтах. При неблагоприятном режиме эта вероятность будет менее значительной.

Следует отметить, что меридиональный ветер определенной направленности в одном полушарии может благоприятствовать развитию ЕРВ (его “растягиванию”), а в другом полушарии, наоборот, препятствовать. Если это так, то целесообразно сравнить полученные вариации $P_{ЕРВ}$ с картиной подъема/опускания плазмы пузыря, провоцируемых меридиональными ветрами (рис. 1б, 2б). Заметим, что эта картина кардинально меняется в зависимости от полушария наблюдения.

Хорошо видно, что *летом* в Северном полушарии (рис. 2а, 2б) при развитии северных ветров наблюдается катастрофичное убывание вероятности наблюдений ЕРВ. Действительно, здесь северный ветер подталкивает плазму (в т.ч. и плазму пузыря) вверх по трубке, тем самым препятствуя “расплыванию” плазмы вдоль трубки. А в Южном полушарии при росте северных ветров, наоборот, наблюдается максимальный рост значений $P_{ЕРВ}$ (рис. 1а, 1б). Здесь северный ветер

способствует опусканию плазмы и тем самым благоприятствует “расплыванию” ЕРВ.

Обратная ситуация развивается *зимой*, когда доминирует южный меридиональный ветер. В Южном полушарии он провоцирует подъем плазмы и препятствует “расплыванию” пузыря, что приводит к подавлению вероятности наблюдения ЕРВ (рис. 1а, 1б). А в Северном полушарии он способствует опусканию плазмы и тем самым благоприятствует развитию ЕРВ (рис. 2а, 2б).

С этой точки зрения вариации $P_{ЕРВ}$, построенные в зависимости от месяца года для каждого полушария, находят свое идеальное объяснение. Максимальные значения $P_{ЕРВ}$ в каждом полушарии достигаются тогда, когда там стоит местная зима и развиваются меридиональные ветры, способствующие опусканию плазмы (в т.ч. и плазмы пузыря) и, соответственно, “расплыванию” пузыря. И, наоборот, минимальные значения $P_{ЕРВ}$ в каждом полушарии достигаются в сезон местного лета, когда развивающийся там меридиональный ветер благоприятствует подъему плазмы и тормозит “расплывание” ЕРВ. Таким влиянием легко объясняется появление асимметрии в развитии пузырей относительно геомагнитного экватора в периоды солнцестояний. Однако, изменчивые по направлению и небольшие по амплитуде меридиональные ветры, развивающиеся в периоды равноденствий, утрачивают способность влиять подобным образом. По этой причине ЕРВ в периоды равноденствий развиваются относительно экватора более или менее симметрично.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы вариации вероятности наблюдения ЕРВ в зависимости от месяца года. Рассмотрены случаи ЕРВ, регистрируемые в районе средних широт $\pm(25^\circ-55^\circ)$ DIPLAT разных полушарий. Для выполнения задачи использованы данные о ЕРВ, полученные на борту спутника ISS-b ($\sim 972-1220$ км) за полтора года наблюдений (август 1978—декабрь 1979 гг.). Проведен сравнительный анализ исследуемой характеристики с месячными вариациями скорости меридионального ветра. Для этого привлечены данные о скорости ветра, рассчитанные по эмпирической модели горизонтальных ветров HWM14 [Drob et al., 2015]. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальные значения в вариациях $P_{ЕРВ}$ каждый раз достигаются в период местной зимы: в декабре—феврале в Северном полушарии ($\sim 19\%$), в июне—августе в Южном полушарии ($\sim 29\%$). Минимальные значения достигаются местным летом: в июне—августе в Северном полушарии ($\sim 3\%$), в декабре—феврале в Южном полушарии

(~4%). Как результат, в периоды солнцестояний имеет место асимметричное развитие EPB относительно геомагнитного экватора.

2. Относительное равенство значений P_{EPB} на гистограммах разных полушарий достигается в периоды равноденствий. Как результат, в эти периоды имеет место почти симметричное “расплывание” EPB относительно геомагнитного экватора.

3. Максимальные значения P_{EPB} в каждом полушарии достигаются в период местной зимы, когда там развиваются меридиональные ветры, способствующие опусканию плазмы пузыря и, соответственно, его “расплыванию” вдоль силовой трубки. Минимальные значения P_{EPB} в каждом полушарии достигаются в сезон местного лета, когда развивающийся там меридиональный ветер благоприятствует подъему плазмы пузыря и тормозит его “расплывание”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 499 с. 1998.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Долготная статистика плазменных “пузырей”, видимых на высотах верхней ионосферы в концентрации Ne^+ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 1. С. 64–77. 2013.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Регистрация плазменных “пузырей” на высотах верхней ионосферы: численные оценки // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 3. С. 355–364. 2014.
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные “пузыри”: Изменчивость широтного распределения с высотой // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 4. С. 445–456. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021040167>
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные пузыри: Влияние термосферных меридиональных ветров // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 62. № 3. С. 374–382. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030166>
- Abdu M.A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamic relevant to spread F // J. Atmos. Terr. Phys. V. 63. № 9. P. 869–884. 2001.
- Barros D., Takahashi H., Wrasse C.M. et al. Asymmetric development of equatorial plasma bubbles observed at geomagnetically conjugate points over the Brazilian sector // J. Geophys. Res. V. 127. № 6. e2021JA030250. 2022.
<https://doi.org/10.1029/2021JA030250>
- Comberiate J., Paxton L.J. Coordinated UV imaging of equatorial plasma bubbles using TIMED/GUVI and DMSP/SSUSI // Space Weather. V. 8. S10002. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009SW000546>
- Devasia C.V., Jyoti N., Subbaro K.S.V. et al. On the plausible leakage of thermospheric meridional winds with equatorial spread F // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 64. № 1. 2002.
- Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W. et al. An Update to the Horizontal Wind Model (HWM): The Quiet Time Thermosphere // Earth and Space Science. V. 2. № 7. P. 301–319. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014EA000089>
- Gasperini F., Forbes J.M., Doornbos E.N. et al. Synthetic thermosphere winds based on CHAMP neutral and plasma density measurements // J. Geophys. Res. V. 121. № 4. P. 3699–3721. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016JA022392>
- Huang C.S., Kelley M.C. Nonlinear evolution of equatorial spread F: 3. Plasma bubbles generated by structured electric fields // J. Geophys. Res. V. 101. P. 303–313. 1996.
- Huba J.D., Krall J. Impact of meridional winds on equatorial spread F: Revisited // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 1268–1272. 2013.
<https://doi.org/10.1002/grl.50292>
- Jyoti N., Devasia C.V., Sridharan R. et al. Threshold height $(h'F)_c$ for the meridional wind to play a deterministic role in the bottom side equatorial spread F and its dependence on solar activity // Geophys. Res. Lett. V. 31. L12809. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019455>
- Kelley M.C. Ionosphere / Encyclopedia of Atmospheric Science. Eds. James R. Holton, John A. Pyle and Judith A. Curry. London: Academic Press, Elsevier Science. 1022 p. 2002.
- Kil H., Paxton L.J., Oh S.-J. Global bubble distribution seen from ROCSAT-1 and its association with the pre-reversal enhancement // J. Geophys. Res. V. 114. № A06307. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013672>
- Krall J., Huba J.D., Joyce G. et al. Three-dimensional simulation of equatorial spread-f with meridional wind effects // Ann. Geophysicae. V. 27. № 5. P. 1821–1830. 2009.
- Krall J., Huba J.D., Joyce G. et al. Simulation of the seeding of equatorial spread-f by circular gravity waves // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 1–5. 2013.
- Maruyama T. A diagnostic model for equatorial spread F. 1. Model description and application to electric field and neutral wind effects // J. Geophys. Res. V. 93. P. 14.611–14.622. 1988.
- Maruyama T., Saito S., Kawamura M. et al. Equinoctial asymmetry of a low-latitude ionosphere-thermosphere system and equatorial irregularities: evidence for meridional wind control // Ann. Geophysicae. V. 27. P. 2027–2034. 2009.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-2027-2009>
- Mendillo M., Meriwether J., Biondi M. Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial spread F // J. Geophys. Res. V. 106. № A3. P. 3655–3663. 2001.
- Otsuka Y., Shiokawa K., Ogawa T. et al. Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 15. P. 43-1–43-4. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015347>
- Rodriguez-Zuluaga J., Stolle C. Interhemispheric field-aligned currents at the edges of equatorial plasma depletions // SCI REP V. 9. № 1. P. 1–8. 2019.
- RRL. Summary Plots of Ionospheric Parameters obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b. Tokyo: Radio Research Laboratories Ministry of Posts and Telecommunications. V. 1–3. 1983.

- *RRL*. Summary Plots of Ionospheric Parameters obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b. Tokyo: Radio Research Laboratories Ministry of Posts and Telecommunications. Special Report. V. 4. 1985.
- *Sau S., Narayanan V., Gurubaran S. et al.* First observation of interhemispheric asymmetry in the EPBs during the St. Patrick's Day geomagnetic storm of 2015 // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 122. № 6. P. 6679–6688. 2017.
- *Sobral J., Abdu M., Pedersen T. et al.* Ionospheric zonal velocities at conjugate points over Brazil during the COPEX campaign: Experimental observations and theoretical validations // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A04309. P. 1–24. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013896>
- *Sidorova L.N., Filippov S.V.* Topside ionosphere He⁺ density depletions: seasonal/longitudinal occurrence probability // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 86. P. 83–91. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.06.013>
- *Sidorova L.N., Filippov S.V.* Plasma bubbles in the topside ionosphere: estimations of the survival possibilities // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 119. P. 35–41. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.06.013>
- *Su S.-Y., Liu C.H., Ho H.H. et al.* Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities: Equatorial versus midlatitude regions // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A06305. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011330>
- *Tsunoda R.T., Livingston R.C., McClure J.P. et al.* Equatorial plasma bubbles: vertical elongated wedges from the bottomside *F* layer // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 9171–9180. 1982.