

УДК 550.388.2

ГЕОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ РАЗВИТИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПУЗЫРЕЙ

© 2024 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 01.05.2024 г.

После доработки 15.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Неоднократно делались попытки исследовать влияние геомагнитной активности на генерацию экваториальных плазменных пузырей. На настоящий момент принято считать, что геомагнитная активность стремится подавить генерацию и развитие экваториальных плазменных пузырей в дополуночном секторе. Что касается послеполуночного сектора, то полагают, что вероятность их наблюдать после полуночи будет возрастать по мере роста геомагнитной активности. Причем темпы роста вероятности будут сильно зависеть от уровня солнечной активности: в минимуме они будут наиболее значительны. Для подтверждения этих идей требуется достаточное количество наблюдательных данных. Для этой цели наилучшим образом подходят наблюдения экваториальных плазменных пузырей, полученные в до- и послеполуночном секторе на борту спутника ISS-b (~972–1220 км, 1978–1979). Данные были рассмотрены в двух широтных регионах: экваториально-низкоширотном $\pm 20^\circ$ и среднеширотном $\pm (20^\circ - 52^\circ)$. Для обеих групп были рассчитаны LT и Kp -вариации вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей. (1) Выявлено, что максимум вероятности наблюдения пузырей, регистрируемых на экваторе и в низких широтах, приходится на дополуночный сектор. Вероятность их наблюдать убывает по мере роста Kp -индекса, взятого за 3 и 9 часов до их регистрации. (2) Однако, максимум вероятности наблюдения пузырей, регистрируемых на средних широтах, приходится на послеполуночный сектор. Вероятность их наблюдать немного возрастает по мере роста Kp -индекса, взятого за 9 часов до их регистрации. Таким образом, получено подтверждение идеи о влиянии на генерацию послеполуночных экваториальных плазменных пузырей механизма возмущенного ионосферного динамо. Он “включается” после нескольких часов повышенной геомагнитной активности и благоприятствует генерации. Однако его влияние ослаблено в годы повышенной солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794024060075, EDN: QOLYNN

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с пионерских работ Woodman and La Hoz [1976] принято считать, что экваториальные плазменные пузыри (equatorial plasma bubbles, EPB) или экваториальное F -рассеяние (equatorial spread F, ESF) формируются после захода Солнца под влиянием плазменной неустойчивости Рэлея–Тейлора (RT), развивающейся на высотах основания F -области. А именно, в вечерний период, когда солнечный терминатор пересекает экваториальные широты, наблюдается резкий всплеск электрических полей восточного направления (pre-reversal enhancement, PRE). Всплеск полей вызывает мощный восходящий $E \times B$ дрейф, который приводит к быстрому подъему основания

экваториальной F -области до высот, где темпы роста RT-неустойчивости доминируют и становятся решающими. Как результат, возникают благоприятные условия для генерации EPB (ESF).

Помимо суточной изменчивости, экваториальные электрические поля испытывают возмущения в период геомагнитных бурь под влиянием двух высокоширотных факторов — магнитных возмущений, возникающих под воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли [Senior and Blanc, 1984], и ионосферных возмущений [Blanc and Richmond, 1980].

Динамические взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, ведущие к изменению потенциала в полярной шапке, в низких широтах

вызывают появление так называемых электрических полей прямого или быстрого проникновения (prompt penetration electric fields, PP) и приводят к росту возмущенности зональных электрических полей [Kelley et al., 1979; Fejer and Scherliess, 1997]. Электрические поля прямого или быстрого проникновения (PP) являются короткоживущими (~1–2 ч) и практически мгновенно распространяются в низкие и экваториальные широты [Fejer, 1991].

Ионосферные возмущения появляются благодаря развитию глобальной термосферной циркуляции, наведенной джоулевым нагревом в авроральных широтах. По мере развития циркуляционных процессов возмущенное ионосферное динамо (ionospheric disturbance dynamo, IDD) генерирует долгоживущие возмущения электрического поля на средних и в низких широтах [Scherliess and Fejer, 1997]. В экваториальных широтах IDD вызывают появление долгоживущих (несколько часов) электрических полей, имеющих западное направление в дополуночном секторе. Эти процессы развиваются достаточно медленно — несколько часов с момента начала геомагнитной бури (суббури) [Fejer and Scherliess, 1995]. Согласно Blanc and Richmond [1980] временная задержка между началом суббури и развитием мощного электрического поля в экваториальных широтах может достигать ~9 ч).

Как результат, суперпозиция электрических полей разной природы (PP и IDD) может либо усиливать, либо ослаблять эффект PRE в период захода Солнца. Иными словами, электрические поля PP и поля ветрового динамо (IDD), накладываясь на регулярные вариации экваториальных электрических полей, могут либо благоприятствовать процессам генерации EPB, либо их подавлять. Считают, что рост/подавление EPB зависит от относительного вклада полей PP и IDD в зависимости от начала бури и местного времени [Martinis et al., 2005; Basu et al., 2007]. Например, как было показано Martinis et al. [2005], имеется устойчивая взаимосвязь между послезаходным EPB и быстрыми временными изменениями в межпланетном электрическом поле, вызванным вариациями B_z -компоненты IMF. Эти изменения способствуют мгновенному развитию полей PP восточной полярности, что является благоприятной ситуацией для роста RT-неустойчивости. С другой стороны, механизм IDD в экваториальных широтах вызывает появление долгоживущих электрических полей, имеющих в дополуночном секторе западное направление, что приводит к подавлению темпов RT-неустойчивости. Эти долгоживущие поля, инициированные, напри-

мер, рядом последовательных суббурь, имеют свойство накладываться и создавать длительный эффект подавления генерации EPB.

В результате возникает довольно сложная, запутанная картина влияния геомагнитной активности (влияния через разные медиаторы) на процессы генерации EPB (ESF).

Неоднократно делались попытки исследовать это влияние. На настоящий момент исследователи пришли к единому мнению о том, что геомагнитная активность стремится подавить генерацию EPB в дополуночном секторе. (Иными словами, при росте Kp -индекса наблюдается уменьшение вероятности наблюдения EPB.) Что касается послеполуночного сектора, то считают (см., например, [Bowman, 1978; Burke, 1979; Singh et al., 1997]), что вероятность наблюдать EPB после полуночи будет расти по мере роста геомагнитной активности.

Для достижения лучшего понимания относительного вклада разных медиаторов (PP и IDD) в перенос энергии геомагнитных бурь проводились исследования, связанные с изучением задержки влияния Kp -индекса как индикатора буревой активности, на генерацию/развитие EPB (см., например, [Palmroth et al., 2000; Sobral et al., 2002; Li et al., 2009]). Очевидно, что учет задержки Kp -индекса позволяет с некой долей вероятности “отсечь” мгновенное влияние короткоживущих электрических полей PP. Было выявлено [Li et al., 2009], что магнитная активность уверенно подавляет генерацию EPB с задержкой по времени 4–9 часов в экваториальном регионе и с задержкой в 8–9 часов в низкоширотном регионе. При этом рассматривались только дополуночные EPB (послеполуночных было недостаточно для статистического анализа). В работе [Sobral et al., 2002] по данным за 22 года оптических наблюдений было выявлено, что при изменениях Kp -индекса в период 18–21 LT (т.е. на старте развития EPB) вероятность наблюдать EPB сначала убывала при росте Kp -индекса до 5, а при $Kp \geq 5$, наоборот, возрастала. К сожалению, авторы не конкретизировали сектор наблюдений EPB. Однако другие исследователи [Palmroth et al., 2000], опираясь на данные спутника DE 2, провели четкое разделение EPB по секторам наблюдения. Для вечерних случаев (19–23 MLT) было выявлено, что лучшая обратная корреляция имеет место при задержке Kp -индекса на 2 и 9 часов. Для утренних случаев (23–06 MLT) была обнаружена прямая корреляция, причем лучшая имела место с задержкой Kp -индекса на 2–4 часа и 9 часов.

В настоящей работе продолжено изучение эффекта задержки влияния Kp -индекса на разви-

тие ЕРВ на протяжении всей ночи. Особое внимание уделено послеполуночному сектору. Важно отметить, что проведение такого исследования стало возможным благодаря тому, что накоплен значительный материал (данные спутника ISS-b), касающийся случаев ЕРВ, регистрируемых на высотах верхней ионосферы (~1000 км) как в дополуночном, так и в послеполуночном секторе [Сидорова, 2020; 2021; 2022]. По данным спутника ISS-b рассчитаны гистограммы вероятности наблюдений ЕРВ в зависимости от широты, местного времени, месяца года и т.д., что позволило получить четкую пространственно-временную картину эволюции ЕРВ на высотах верхней ионосферы [Сидорова, 2020; 2021; 2022; 2023а, б]. Эти результаты оказались крайне полезными и облегчили проведение настоящего исследования.

Для выполнения поставленной задачи были рассчитаны гистограммы вероятности наблюдения ЕРВ в зависимости от местного времени (LT) и уровня геомагнитной активности (Kp). При этом ЕРВ по широтному признаку наблюдений были разбиты на две группы: экваториально-низкоширотные и среднеширотные ЕРВ. Зависимость вероятности наблюдения разных групп ЕРВ от уровня геомагнитной активности (Kp) была исследована для трех случаев, когда задержка Kp -индекса составляла 3, 6 и 9 часов.

2. ДАННЫЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Гистограммы вероятности наблюдения ЕРВ (ЕРВ occurrence probability, $P_{\text{ЕРВ}}$) в зависимости от местного времени (LT) и уровня геомагнитной активности (Kp) были рассчитаны по данным спутника ISS-b [RRL, 1983; 1985]. Спутник ISS-b летал в годы высокой солнечной активности ($F10.7 \sim 150\text{--}220$, 1978–1979), имел квазикруговую орбиту с наклоном $\sim 70^\circ$, покрывающую высоты верхней ионосферы (~972–1220 км). Наблюдения на борту спутника проводились в течение 17 месяцев (август 1978 – декабрь 1979) [RRL, 1983; 1985].

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 (ЕРВ). Для построения использовались только те ЕРВ (области с обедненной концентрацией He^+), концентрация которых уменьшалась в полтора раза и более по отношению к фону.

2.1. Вариации $P_{\text{ЕРВ}}$ в зависимости от местного времени (LT)

Для построения LT-вариаций $P_{\text{ЕРВ}}$ использовались данные о наблюдениях ЕРВ в интервале 17–08 LT. Случаи ЕРВ рассматривались независимо от уровня геомагнитной активности, т.е. при всех значениях Kp -индекса. Значения $P_{\text{ЕРВ}}$ рассчитывались как медианные по двум широтным регионам, покрывающим оба полушария. Рассматривалась область экваториальных и низких широт $\pm 20^\circ$ (рис. 1а), а также область преимущественно средних широт $\pm (20^\circ\text{--}52^\circ)$ (рис. 1б), которая в интервале $\pm (20^\circ\text{--}23.3^\circ)$ пересекала низкие широты. (Точность фиксации орбитальных параметров спутника ISS-b, приведенная в каталогах [RRL, 1983; 1985], невелика, поэтому граница $\pm 20^\circ$ – довольно условная. Далее, для облегчения повествования будем называть эту область “среднеширотной”). Выбор указанных широтных областей связан со следующим.

При подъеме пузыря на высоты верхней ионосферы (ISS-b, ~972–1220 км) под влиянием амбиполярной диффузии происходит “растекание” пузыря вдоль магнитных силовых трубок. Как результат, пузырь приобретает бананообраз-

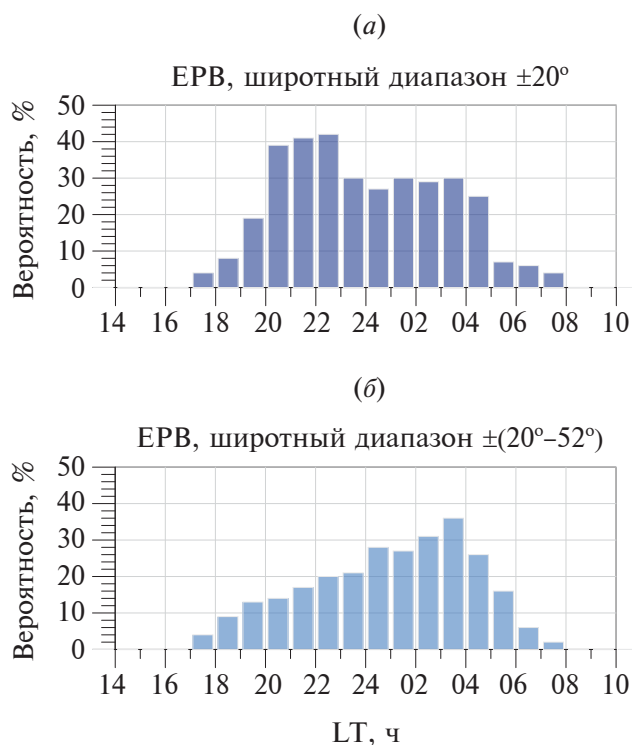


Рис. 1. LT-вариации вероятности наблюдения ЕРВ ($P_{\text{ЕРВ}}$).
(а) – Область экватора и низких широт: $\pm 20^\circ$.
(б) – Область средних широт: $\pm (20^\circ\text{--}52^\circ)$.

ный вид. В таком виде пузырь может регистрироваться не только в экваториальных и низких широтах, но и на средних широтах. По рисунку хорошо видно, что срединная (вершинная) часть поднимающегося пузыря регистрируются над экватором, а его концы регистрируются в низких либо средних широтах. Картина развития структуры пузыря нашла свое подтверждение в исследованиях широтных распределений P_{EPB} , проведенных на разных высотах [Сидорова, 2021]. Было выявлено, что с ростом высоты в широтных распределениях P_{EPB} помимо центрального (экваториального) максимума вероятности развиваются дополнительные среднеширотные максимумы вероятности. Рост и развитие среднеширотных максимумов объясняется фактом достижения EPB своих потолочных высот. (Пузырь, утративший способность к дальнейшему подъему, испытывает торможение, останавливается на силовой

трубке, соответствующей потолочной высоте, и через несколько часов испытывает сжатие (коллапс). Такие пузыри, застывшие у своих потолочных высот, накапливаются, что отражается в появлении среднеширотных максимумов P_{EPB} на высотах верхней ионосферы.)

С учетом вышеизложенного, выбор широтных областей исследования EPB был обусловлен широтами развития указанных максимумов, т.е. областями преимущественной регистрации EPB.

2.2. Вариации P_{EPB} в зависимости от уровня геомагнитной активности (Kp)

Для построения Kp -вариации P_{EPB} использовались данные о наблюдениях EPB в разных интервалах изменения Kp -индекса. Рассматривались 5 интервалов Kp -индекса, отражающих спокойную, умеренно-возмущенную и возмущенную

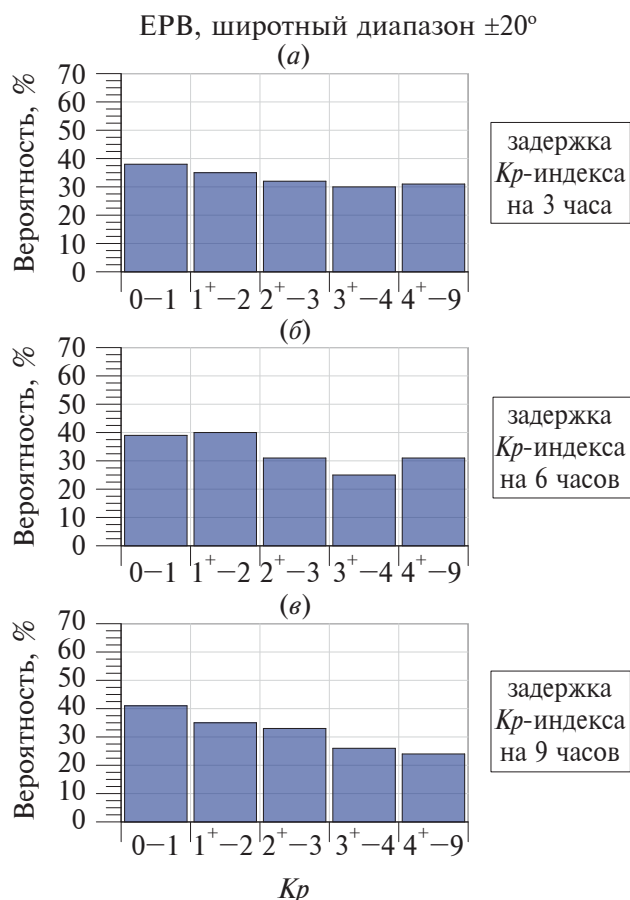


Рис. 2. Вариации P_{EPB} в зависимости от интервального значения Kp -индекса. Область экватора и низких широт: $\pm 20^\circ$.

(a) — Задержка Kp -индекса на 3 часа.
 (б) — Задержка Kp -индекса на 6 часов.
 (в) — Задержка Kp -индекса на 9 часов.

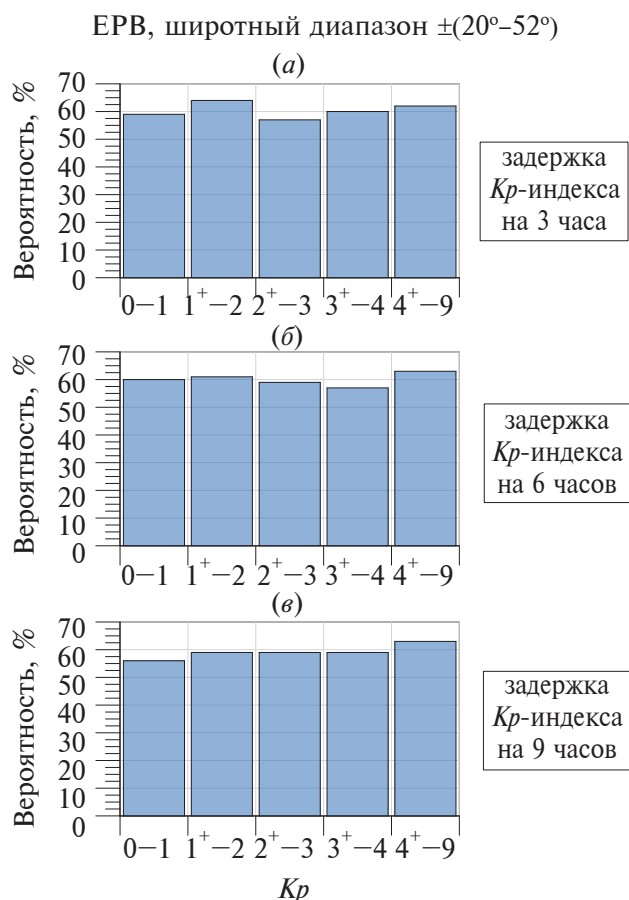


Рис. 3. Вариации P_{EPB} в зависимости от интервального значения Kp -индекса. Область средних широт: $\pm(20^\circ-52^\circ)$.

(a) — Задержка Kp -индекса на 3 часа.
 (б) — Задержка Kp -индекса на 6 часов.
 (в) — Задержка Kp -индекса на 9 часов.

Таблица 1. Числовые характеристики вариаций P_{EPB} в зависимости от интервального значения Kp -индекса. Область экватора и низких широт: $\pm 20^\circ$

Kp интервалы	Задержка Kp -индекса на 3 часа		Задержка Kp -индекса на 6 часов		Задержка Kp -индекса на 9 часов	
	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$
0-1	83 (221)	38	84 (218)	39	93 (223)	41
1 ⁺ -2	83 (234)	35	101 (255)	40	87 (250)	35
2 ⁺ -3	83 (259)	32	82 (263)	31	85 (254)	33
3 ⁺ -4	46 (155)	30	43 (172)	25	46 (175)	26
4 ⁺ -9	35 (114)	31	31 (100)	31	25 (101)	24

Примечание. ¹Значения P_{EPB} округлены до целых чисел.

Таблица 2. Числовые характеристики вариаций P_{EPB} в зависимости от интервального значения Kp -индекса. Область средних широт: $\pm (20^\circ - 52^\circ)$

Kp интервалы	Задержка Kp -индекса на 3 часа		Задержка Kp -индекса на 6 часов		Задержка Kp -индекса на 9 часов	
	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$	Количество EPB и пролетов	$P_{\text{EPB}}^1, \%$
0-1	267 (450)	59	246 (411)	60	251 (444)	56
1 ⁺ -2	287 (447)	64	317 (517)	61	291 (490)	59
2 ⁺ -3	317 (555)	57	311 (525)	59	315 (537)	59
3 ⁺ -4	206 (341)	60	211 (369)	57	214 (361)	59
4 ⁺ -9	151 (244)	62	136 (217)	63	138 (218)	63

Примечание. ¹Значения P_{EPB} округлены до целых чисел.

геомагнитную обстановку: (0–1), (1⁺–2), (2⁺–3), (3⁺–4), (4⁺–9). Поскольку сильные и очень сильные геомагнитные возмущения разной интенсивности имели место не очень часто, для улучшения статистической выборки они были объединены в один интервал: Kp -индекс изменялся в пределах от 4⁺ до 9.

Значения P_{EPB} рассчитывались как медианные по двум широтным регионам, покрывающим оба полушария. Рассматривалась область экваториальных и низких широт $\pm 20^\circ$ (рис. 2), а также область средних широт $\pm (20^\circ - 52^\circ)$ (рис. 3).

Для изучения эффекта задержки влияния Kp -индекса, как индикатора буревой активности, на генерацию EPB рассматривались три случая задержки. В первом случае (рис. 2а, 3а) использовались значения Kp -индекса, взятые за 3 часа до регистрации EPB. Во втором случае (рис. 2б,

3б) – за 6 часов до регистрации EPB. В третьем случае (рис. 2в, 3в), соответственно, за 9 часов до регистрации EPB. Числовые характеристики указанных вариаций отражены в таблицах 1, 2.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

1. Проведем детальный сравнительный анализ LT-вариаций вероятности наблюдения EPB (P_{EPB}), выявленных в разных широтных областях (рис. 1а, б).

LT-вариации P_{EPB} , полученные на экваторе и в низких широтах $\pm 20^\circ$, имеют максимум вероятности, приходящийся на ~20:00–23:00 LT, т.е. на дополуночный сектор. К полуночи значения P_{EPB} испытывают падение и остаются приблизительно на одном довольно высоком уровне весь послеполуночный период вплоть ~05:00 LT.

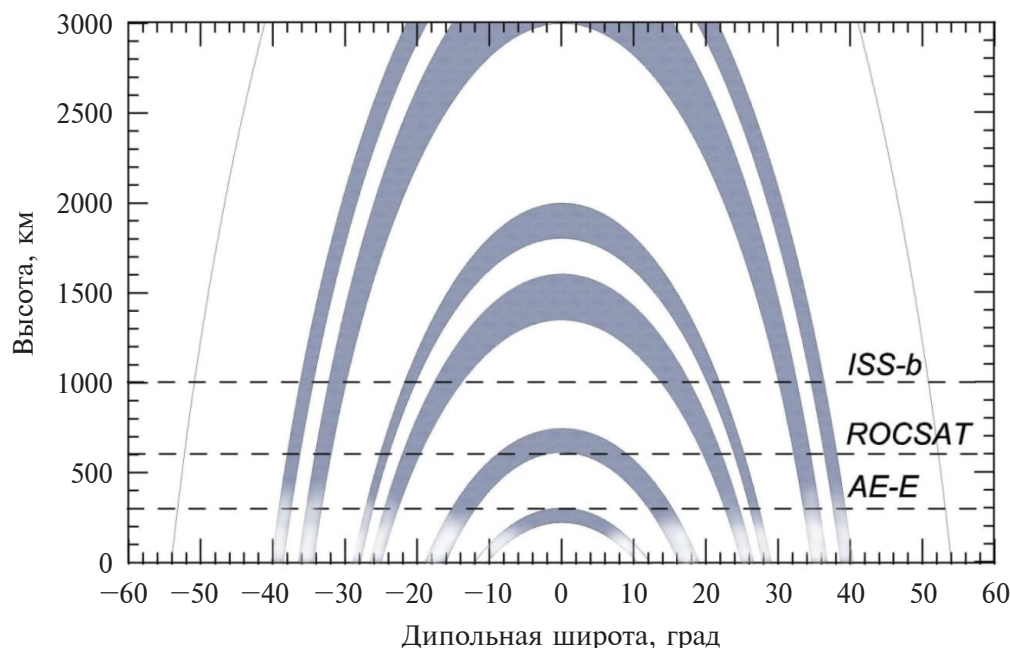


Рис. 4. Схематическое изображение эволюции экваториальных плазменных пузырей относительно магнитных силовых трубок, дипольной широты и высоты. Горизонтальными линиями показаны приблизительные высоты пролетов спутников ISS-b (~972–1220 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~350–475 км).

С другой стороны, у LT-вариаций P_{EPB} , полученных на средних широтах $\pm(20^\circ\text{--}52^\circ)$, максимум приходится на послеполуночный период (~02:00–04:00 LT). Значения P_{EPB} плавно нарастают после захода Солнца до указанного периода, а затем испытывают резкое падение к часам восхода.

2. Теперь обратимся к Kp -вариациям P_{EPB} (рис. 2, 3).

Kp -вариации P_{EPB} , полученные в области экватора и низких широт $\pm 20^\circ$ (рис. 2), при задержке Kp -индекса на 3 часа показывают слабую обратную зависимость P_{EPB} от Kp . При задержке Kp -индекса на 6 часов эта зависимость нарушается. Однако при задержке Kp -индекса на 9 часов она восстанавливается и становится значительной: при росте Kp значения P_{EPB} отчетливо убывают.

Kp -вариации P_{EPB} , полученные в области средних широт $\pm(20^\circ\text{--}52^\circ)$ (рис. 3), при задержках Kp -индекса на 3–6 часов четкой зависимости P_{EPB} от Kp не имеют. Однако при задержке Kp -индекса на 9 часов значения P_{EPB} находятся в прямой зависимости от Kp -индекса: они немного возрастают при росте значений Kp .

Следует указать, что Kp -вариации P_{EPB} в экваториально-низкоширотном регионе изменяются в пределах 24–41%, а в среднеширотном — 56–

64%. Действительно, как следует из гистограмм и таблиц 1, 2, количество среднеширотных EPB явно превалирует над экваториально-низкоширотными.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

1. Как указывалось во Введении, основная цель проводимого исследования является изучение влияния геомагнитной активности на генерацию EPB. Однако, чтобы разобраться в деталях этого влияния, необходимо иметь картину эволюции EPB, например, в широтно-временной развертке. Данные спутника ISS-b позволяли получить эту картину на фиксированных высотах верхней ионосферы. По этим данным в разных широтных областях были получены LT-вариации P_{EPB} . Обсудим их.

Было выявлено, что EPB, регистрируемые на экваторе и в низких широтах $\pm 20^\circ$, доминируют (имеют максимум вероятности наблюдений) в дополуночном секторе. С другой стороны, EPB, регистрируемые на средних широтах $\pm(20^\circ\text{--}52^\circ)$, доминируют в послеполуночном секторе. Резонно задаться вопросом о причинах этого явления.

Ранее (см., например, [Сидорова, 2020]) по ряду спутниковых данных (CHAMP, AE-E, ROCSAT-1, Hinotori, ISS-b) было выявлено, что с ростом высоты наблюдения возникает четкая тенденция сдвига максимума вероятности наблюдения EPB

по времени. Так, если на высотах основания F -области максимум приходится на послезаходные часы ($\sim 20:30$ – $22:00$ LT, CHAMP, AE-E, ~ 400 км), то по мере роста высоты наблюдения он смещается к предполуночным ($\sim 21:00$ – $24:00$ LT, ROCSAT-1, ~ 600 км), далее к послеполуночным ($\sim 01:00$ – $03:00$ LT, Hinotori, ~ 650 км) и, наконец, к предрассветным ($\sim 03:00$ – $04:00$ LT, ISS-b, ~ 972 – 1220 км) часам. Для объяснения этого феномена следует обратиться к рис. 4.

Как уже указывалось (см., например, [Сидорова, 2021]), плазменные пузыри по мере своего подъема на большие высоты под влиянием амбиполярной диффузии начинают “растягиваться/растекаться” вдоль магнитных силовых трубок, приобретая бананообразный вид (рис. 4). В начальную фазу своего развития пузыри регистрируются строго в пределах экваториального региона, поскольку испытывают еще крайне незначительное диффузионное “растекание”. Как результат, появление (“приход”) таких ЕРВ регистрируется как четкий максимум вероятности в дополуночном секторе [Stolle et al., 2006]. Далее, по мере подъема пузырей в полную силу вступают процессы диффузионного “растекания” и ЕРВ могут регистрироваться не только в экваториальных, но и в низких широтах. При этом максимум их вероятности постепенно “размывается”: вершина становится более плоской, спуск становится более пологим и длинным [Watanabe and Oya, 1986; Li et al., 2009; Сидорова, 2020]. Именно такой формы нами получены LT-вариации $P_{\text{ЕРВ}}$ для случаев ЕРВ, выявляемых на экваторе и в низких широтах $\pm 20^\circ$ (рис. 1а). Очевидно, что на высотах спутника ISS-b (~ 972 – 1220 км) в этих широтах фиксируются верхушки пузырей либо части пузырей, наиболее близкие к верхушкам. При этом максимум вероятности “прихода” ЕРВ, по-прежнему сохраняется в дополуночном секторе. Дальнейший подъем пузыря на высоты верхней ионосферы приводит к тому, что его “концы” начинают проецироваться на средние широты. Большая часть пузырей достигает своих потолочных высот, останавливается на них и накапливается. Их накопление отражается в появлении предрассветного максимума на гистограмме LT-распределения вероятности наблюдения ЕРВ, рассчитанной по всему широтному диапазону $\pm 50^\circ$ [Сидорова, 2020]. И наиболее четко этот предрассветный максимум ($\sim 04:00$ – $03:00$ LT) проявляется в LT-вариациях $P_{\text{ЕРВ}}$, рассчитанных конкретно для области средних широт $\pm (20^\circ$ – $52^\circ)$ (рис. 1б). Примечательно, что эти вариации идентичны LT-вариациям вероятности наблюдений послеполуночно-

го ESF, полученным в работе Fejer et al. [1999] (рис. 12 указанной работы).

С учетом вышеизложенного, привязка к широтным областям $\pm 20^\circ$ и $\pm (20^\circ$ – $52^\circ)$ обусловлена не только тем, что они являются областями преимущественной регистрации ЕРВ (как показано ранее в пункте 2.1), но и тем, что там проявляются особенности LT-вариаций $P_{\text{ЕРВ}}$.

2. Обратимся теперь к предмету исследования, а именно обсудим вариации $P_{\text{ЕРВ}}$, построенные в зависимости от уровня геомагнитной активности (Kp) (рис. 2, 3). Проанализируем эффект задержки влияния Kp -индекса на развитие ЕРВ в разных секторах наблюдений.

а) Рассмотрим ЕРВ, выявленные в области $\pm 20^\circ$ (экватор и низкие широты) и доминирующие в дополуночном секторе. Было получено, что их вариации $P_{\text{ЕРВ}}$ находятся в слабой обратной зависимости от Kp при задержке последнего на 3 часа (рис. 2а). Эта тенденция нарушается при задержке Kp -индекса на 6 часов (рис. 2б) и восстанавливается при задержке Kp -индекса на 9 часов. Причем в последнем случае обратная зависимость становится весьма выраженной (рис. 2в).

Необходимо отметить, что полученные результаты довольно хорошо согласуются с результатами исследований, полученными по данным спутника DE 2 (~ 309 – 1012 км, 1981–1983) [Palmroth et al., 2000]. Там Kp -вариации $P_{\text{ЕРВ}}$, выявленные в дополуночном секторе (19–23 MLT), показывали обратную зависимость от Kp -индекса при задержке последнего на 2 часа. Затем эта зависимость нарушалась и восстанавливалась только при задержке Kp -индекса на 9 часов (см. рис. 7 в работе [Palmroth et al., 2000]).

Аналогичная тенденция наблюдалась в поведении гистограмм $P_{\text{ЕРВ}}$, рассчитанных за 3 года наблюдений по данным станций наземного зондирования в экваториальных и низких широтах Юго-Восточной Азии [Li et al., 2009]. Так, на экваторе обратная зависимость возникала при задержке Kp -индекса на 4 часа, а в низких широтах — при задержке Kp -индекса на 8–9 часов (см. рис. 8–9 в работе [Li et al., 2009]).

Таким образом, полученные нами результаты не противоречат ранее известным. Известно, что в дополуночном секторе генерация ЕРВ подавляется из-за развития долгоживущих возмущенных электрических полей западной полярности, развивающихся через несколько часов после буревой активности. Эти возмущенные поля появляются под воздействием ионосферного ветрового динамо или так называемого IDD-эффекта (ionospheric disturbance dynamo, IDD), развивающегося на

средних и в низких широтах через несколько часов после начала бури [Scherliess and Fejer, 1997]. Возмущенные электрические поля накладываются на электрические поля регулярного динамо-эффекта, который остается активным даже в периоды геомагнитных возмущений. При этом генерация EPB не прекращается совсем, а лишь подавляется, так как снижаются темпы роста RT-неустойчивости.

Очевидно, что электрические поля быстрого или прямого проникновения (PP) также оказывают свое влияние. Они могут как благоприятствовать генерации EPB, так и подавлять ее. Их влияние развивается мгновенно, правда, действует недолго (~1–2 ч), поэтому в эффекте, связанном с задержкой влияния Kp -индекса, они практически не сказываются.

Согласно нашим результатам, IDD-эффект начинает проявляться при задержке Kp -индекса уже на 3 часа, что хорошо согласуется с указанием Fejer and Scherliess [1995]. Далее влияние IDD нарушается. Однако восстанавливается при задержке Kp -индекса на 9 часов, что опять же согласуется с выводами Blanc and Richmond [1980].

б) Рассмотрим EPB, полученные в области средних широт $\pm(20^\circ\text{--}52^\circ)$ и доминирующие в послеполуночном (утреннем) секторе. Хорошо видно, что их вариации P_{EPB} не имеют явной зависимости от Kp -индекса при задержке последнего на 3–6 часов. Однако при задержке Kp -индекса на 9 часов значения P_{EPB} находятся в прямой зависимости от Kp : при росте Kp значения P_{EPB} показывают небольшой рост (рис. 3в).

Как указывалось ранее, аналогичный результат был получен по данным спутника DE 2 [Palmroth et al., 2000]. Для утренних случаев EPB (23–06 MLT) была выявлена прямая корреляция значений P_{EPB} и Kp -индекса (рис. 10 в работе [Palmroth et al., 2000]). Причем лучшая корреляция имела место с задержкой Kp -индекса на 2–4 часа и 9 часов. Полученные нами и Palmroth et al. [2000] результаты перекликаются только при задержке Kp -индекса на 9 часов. По всей видимости, особенности орбитальных параметров спутников ISS-b (~972–1220 км, 1978–1979) и DE 2 (~309–1012 км, 1981–1983), их приборная разница, а также разница в уровне солнечной активности и длительности наблюдений вносят свои коррективы в сравниваемые результаты.

Какие же электродинамические процессы ответственны за отклик вероятности наблюдений послеполуночных EPB на развитие геомагнитных возмущений?

Известно, что электрические поля IDD в послеполуночный период меняют свою полярность с западной на восточную. В этом случае наиболее благоприятные условия для образования EPB (ESF) возникают после значительного и внезапного уменьшения конвекции в высоких широтах, когда поля быстрого проникновения (PP) и возмущенные электрические поля IDD приводят к развитию значительного ночного восходящего плазменного дрейфа с наибольшей амплитудой в ~04:00 LT [Fejer et al., 1999]. (Следует упомянуть, что эти выводы сделаны при анализе данных радарного наблюдения, полученных в obs. Джикамарка за период с 1968 по 1992 г.) Значительный восходящий плазменный дрейф, возникающий в послеполуночный период как отклик на влияние IDD и PP полей, является возмущенным (наведенным) дрейфом в противовес регулярному для этого времени нисходящему дрейфу. Возмущенный дрейф поднимает F -область на большие высоты, где частота ион-нейтральных соударений падает, а темпы роста RT-неустойчивости растут, что ведет к генерации EPB. Этот возмущенный дрейф может легко преодолеть небольшие нисходящие регулярные дрейфы спокойного периода.

Правда, внезапное усиление конвекции приводит к развитию электрических полей (PP) западного направления, что увеличивает скорость нисходящего дрейфа, уменьшает высоту F -области и препятствует образованию неоднородностей. Очевидно, что при рассмотрении Kp -индекса с небольшой задержкой (например, в 3 часа) процессы, ведущие к появлению дрейфа разной направленности, еще заметны и сказываются в резком росте либо падении значений P_{EPB} при близких значениях Kp . В целом же, общей тенденции зависимости P_{EPB} от Kp -индекса еще не прослеживается. Однако, при задержке Kp -индекса на 9 часов, когда после нескольких часов повышенной геомагнитной активности полноценно “включается” механизм IDD, то при росте геомагнитной активности виден небольшой рост значений P_{EPB} . Почему небольшой?

Согласно [Fejer et al., 1999], связь послеполуночных EPB (ESF) с аномальным реверсом регулярного (обычного) нисходящего дрейфа на восходящий может зависеть от солнечного цикла. Возмущенный дрейф может легко преодолеть небольшие нисходящие дрейфы спокойного периода в эпоху солнечного минимума. Однако в условиях более интенсивной солнечной активности для формирования послеполуночных EPB (ESF) требуется более значительный возмущенный дрейф, поскольку в солнечный максимум

значительно увеличивается скорость нисходящего дрейфа. Наши результаты, полученные по данным спутника ISS-b (1978–79) в годы повышенной солнечной активности ($F_{10.7} \sim 150\text{--}220$), являются тому подтверждением: послеполуночный рост $P_{\text{ЕРВ}}$ оказывается небольшим.

в) Как было выявлено (табл. 1 и 2; рис. 2 и 3), ЕРВ чаще регистрируются на средних широтах, чем на экваторе и в низких широтах. Чем можно объяснить эту разницу?

Если кратко, то это зависит от соотношения фоновой концентрации He^+ и величины истощения плазменного пузыря в концентрации He^+ . (Напомним, что ЕРВ по данным спутника ISS-b определялись как плазменные области с обедненной концентрацией в ионах гелия He^+ , т.е. выявлялись по флуктуации одной ионной составляющей (см., например, [Сидорова, 2021]).) Рассмотрим это более подробно.

Как известно ЕРВ формируются на высотах основания F -области. А хорошо известно, что на этих высотах ионы гелия присутствуют в очень малом количестве. Например, согласно радарным измерениям на ст. Аресибо [Wilford et al., 2003] в период высокой солнечной активности (октябрь, 2001 г.) абсолютная концентрация He^+ на этих высотах составляла $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Очевидно, что мере подъема до высот верхней ионосферы (ISS-b, $\sim 972\text{--}1220$ км) пузырь постепенно “проявляется” (становится “виден”) как структура, сильно обедненная в ионах He^+ . Он становится “виден” поскольку окружающая фоновая концентрация He^+ на этих высотах существенно возрастает и достигает своих максимальных значений (может быть даже доминантой [Heelis et al., 1990]), что дает хороший контраст с мизерной концентрацией He^+ внутри плазменного пузыря.

Однако, не на всех широтах, над которыми всплывает и “растягивается” пузырь, он будет одинаково хорошо заметен. Это зависит от широтного профиля фоновой концентрации He^+ . Поведение широтного профиля как раз и будет определять широтные области с разной степенью “видимости” плазменного пузыря.

В ночные часы на высотах верхней ионосферы в фоновой концентрации He^+ развивается экваториальный провал, во впадине и на гребнях которого могут регистрироваться ЕРВ. Непосредственно сама впадина экваториального провала приходится на широты $\sim (\pm 20^\circ)$, а гребни провала могут достигать $\pm 30^\circ\text{--}40^\circ$ (см., например, [Taylor, 1971]). Наиболее хорошо ЕРВ видны на гребнях провала: вершине гребня, внутреннем и внешнем его склонах. Пузыри видны очень хорошо, поскольку наиболее хорошо контрастируют с повы-

шенной здесь фоновой концентрацией He^+ . Несколько труднее ЕРВ могут регистрироваться во впадине провала, поскольку фоновая концентрация He^+ во впадине значительно ниже и хуже контрастирует с концентрацией He^+ внутри пузыря. Этим и объясняется значительная разница в вероятности наблюдения ЕРВ на разных широтах. В области впадины экваториального провала фоновой концентрации He^+ , т.е. на широтах $\sim (\pm 20^\circ)$, вероятность наблюдать ЕРВ понижена, а на широтах гребней со склонами, т.е. на средних широтах $\pm (20^\circ\text{--}52^\circ)$, ЕРВ обнаруживаются намного чаще.

Итак, получена четкая картинка проявления ЕРВ на средних широтах, т.е. тех ЕРВ, которые доминируют в послеполуночном секторе. Это позволяет уверенно заключить, что получено подтверждение идеи о влиянии на генерацию послеполуночных ЕРВ механизма IDD, который “включается” после нескольких часов повышенной геомагнитной активности и благоприятствует генерации. Однако, согласно исследованию, это влияние невелико в годы повышенной солнечной активности, что согласуется с указаниями [Fejer et al., 1999].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неоднократно делались попытки исследовать влияние геомагнитной активности на генерацию экваториальных плазменных пузырей. На сегодняшний день хорошо известно, что геомагнитная активность стремится подавить генерацию и развитие ЕРВ в дополуночном секторе. Что касается послеполуночного сектора, то полагают [Bowman, 1978; Burke, 1979; Singh et al., 1997], что вероятность наблюдать ЕРВ после полуночи будет расти по мере роста геомагнитной активности. Правда, есть указания [Fejer et al., 1999], что темпы ее роста будут зависеть от уровня солнечной активности. В минимуме солнечной активности они будут наиболее значительными. Для подтверждения этих идей требуется достаточное количество наблюдательных данных. Для этой цели наилучшим образом подходят наблюдения ЕРВ, полученные в дополуночном и послеполуночном секторах на борту спутника ISS-b ($\sim 972\text{--}1220$ км, август 1978–декабрь 1979). Данные рассматривались в двух широтных регионах: экваториально-низкоширотном $\pm 20^\circ$ и среднеширотном $\pm (20^\circ\text{--}52^\circ)$. Для обеих групп были рассчитаны LT- и Kp -вариации вероятности наблюдения ЕРВ. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

ЕРВ, регистрируемые в низких и экваториальных широтах, имеют максимум вероятности на-

блюдения в дополуночном секторе. Вероятность их наблюдения убывает по мере роста Kp -индекса, взятого за 3 и 9 часов до регистрации ЕРВ.

ЕРВ, регистрируемые на средних широтах, имеют максимум вероятности наблюдения в послеполуночном секторе. Вероятность их наблюдать немного возрастает по мере роста Kp -индекса, взятого за 9 часов до регистрации ЕРВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Долготная статистика плазменных “пузырей”, видимых на высотах верхней ионосферы в концентрации He^+ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 64–77. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794012060107>
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные “пузыри”: зависимость от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. 557–565. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020050144>
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные “пузыри”: Изменчивость широтного распределения с высотой // Геомагнетизм и аэрономия. 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 аэрономия. Т. 62. № 3. С. 374–382. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022030166>
- Сидорова Л.Н. Вероятность наблюдения экваториальных плазменных пузырей в зависимости от месяца года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 2. С. 238–246. 2023а. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600533>
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные пузыри: влияние зонального термосферного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 798–805. 2023б. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600369>
- Basu S., Basu S., Rich F.J., Groves K.M., MacKenzie E., Coker C., Sahai Y., Fagundes P.R., Becker-Guedes F. Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms // J. Geophys. Res. — Space. V. 112. № 8. ID A08308. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006JA012192>
- Blanc M., Richmond A.D. The ionospheric disturbance dynamo // J. Geophys. Res. — Space. V. 85. № 4. P. 1669–1686. 1980. <https://doi.org/10.1029/JA085iA04p01669>
- Bowman G.G. A relationship between polar magnetic substorms, ionospheric height rises and the occurrence of spread F // J. Atmos. Terr. Phys. V. 40. № 6. P. 713–722. 1978. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90129-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90129-0)
- Burke W.J. Plasma bubbles near the dawn terminator in the topside ionosphere // Planet. Space Sci. V. 27. № 9. P. 1187–1193. 1979. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(79\)90138-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(79)90138-7)
- Fejer B.G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: A review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 53. № 8. P. 677–693. 1991. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90121-M](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90121-M)
- Fejer B.G., Scherliess L. Time dependent response of equatorial electric fields to magnetospheric disturbances // Geophys. Res. Lett. V. 22. № 7. P. 851–854. 1995. <https://doi.org/10.1029/95GL00390>
- Fejer B.G., Scherliess L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields // J. Geophys. Res. — Space. V. 102. № 11. P. 24047–24056. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA02164>
- Fejer B.G., Scherliess L., de Paula E.R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F // J. Geophys. Res. — Space. V. 104. № 9. P. 19859–19869. 1999. <https://doi.org/10.1029/1999JA900271>
- Heelis R.A., Hanson W.B., Bailey G.J. Distributions of He^+ at middle and equatorial latitudes during solar maximum // J. Geophys. Res. — Space. V. 95. № 7. P. 10313–10320. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10313>
- Kelley M.C., Fejer B., Gonzales C. An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field // Geophys. Res. Lett. V. 6. № 4. P. 301–304. 1979. <https://doi.org/10.1029/GL006i004p00301>
- Li G., Ning B., Liu L., Wan W., Liu J.Y. Effect of magnetic activity on plasma bubbles over equatorial and low-latitude regions in East Asia // Ann. Geophys. V. 27. № 1. P. 303–312. 2009. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-303-2009>
- Martinis C.R., Mendillo M.J., Aarons J. Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic storms // J. Geophys. Res. — Space. V. 110. № 7. ID A07306. 2005. <https://doi.org/10.1029/2003JA0101362>
- Palmroth M., Laakso H., Fejer B.G., Pfaff R.F. Jr. DE 2 observations of morningside and eveningside plasma density depletions in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. — Space. V. 105. № 8. P. 18429–18442. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JA005090>
- 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.
- Scherliess L., Fejer B.G. Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields // J. Geophys. Res. — Space. V. 102. № 11. P. 24037–24046. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA02165>
- Senior C., Blanc M. On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities // J. Geophys. Res. — Space. V. 89. № 1. P. 261–284. 1984. <https://doi.org/10.1029/JA089iA01p00261>
- 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>

- Singh S., Bamgboye D.K., McClure J.P., Johnson F.S. Morphology of equatorial plasma bubbles // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 102. № 9. P. 20019–20029. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA01724>
- Sobral J.H.A., Abdu M.A., Takahashi H., Taylor M.J., de Paula E.R., Zamlutti C.J., de Aquino M.G., Borba G.L. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977–1998) of 630 nm airglow observations // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 64. № 12–14. P. 1517–1524. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00089-5)
- Stolle C., Lühr H., Rother M., Balasis G. Magnetic signatures of equatorial spread *F* as observed by the CHAMP satellite // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 111. № 2. ID A02304. <https://doi.org/10.1029/2005JA011184>. 2006.
- Taylor H.A. Evidence of solar geomagnetic seasonal control of the topside ionosphere // *Planet. Space Sci.* V. 19. № 1. P. 77–93. 1971. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(71\)90068-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(71)90068-7)
- Watanabe S., Oya H. Occurrence characteristics of low latitude ionospheric irregularities observed by impedance probe on board the Hinotori satellite // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 38. № 2. P. 125–131. 1986. <https://doi.org/10.5636/jgg.38.125>
- Wilford C.R., Moffett R.J., Rees J.M., Bailey G.J., Gonzalez S.A. Comparison of the He⁺ layer observed over Arecibo during solar maximum and solar minimum with CTIP model results // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 108. № 12. P. 1452–1461. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JA009940>.
- Woodman R.F., La Hoz C. Radar observations of *F*-region equatorial irregularities // *J. Geophys. Res.* V. 81. № 31. P. 5447–5466. 1976. <https://doi.org/10.1029/JA081i031p05447>

Geomagnetic Control on the Equatorial Plasma Bubble Formation

L. N. Sidorova*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation (IZMIRAN), Moscow, Troitsk

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

Attempts have been made repeatedly to investigate the effect of magnetic activity on the equatorial plasma bubble (EPB) generation. At the moment, it is generally accepted that magnetic activity tends to suppress the EPB generation and evolution in the pre-midnight sector. As for the post-midnight sector, it is believed that the EPB occurrence probability will increase after midnight as magnetic activity increases. Moreover, the growth rates of the EPB occurrence probability will strongly depend on solar activity: at the solar activity minimum, they will be the most significant. A sufficient amount of the observations is required to confirm these ideas. For this purpose, the EPB observations obtained on board the ISS-b satellite (~972–1220 km, 1978–1979) in the pre- and post-midnight sectors are best suited. The data were considered in two latitudinal regions: equatorial/low-latitudinal ($\pm 20^\circ$) and mid-latitudinal ($\pm (20^\circ\text{--}52^\circ)$) regions. LT- and *Kp*-variations of the EPB occurrence probability were calculated for both groups. (1) It was revealed that the occurrence probability maximum of the EPBs recorded at the equator and in low latitudes is in the pre-midnight sector. The EPB occurrence probability decreases with increasing *Kp* index with a delay of 3 and 9 hours before the EPB detection. (2) However, the occurrence probability maximum of the EPBs recorded at the mid-latitudes is in the post-midnight sector. Their occurrence probability increases slightly as *Kp* index increases, when *Kp* is a 9-hours delayed one. Thus, the idea of the ionospheric disturbance dynamo (IDD) influence on the post-midnight EPB generation has been confirmed. IDD mechanism sets in after some hours of enhanced geomagnetic activity and favors the generation. However, its influence is weakened during the years of increased solar activity.