

## ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

© 2020 г. Л. Н. Сидорова\*

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

\*e-mail: lsid@izmiran.ru

Поступила в редакцию 22.02.2020 г.

После доработки 23.03.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

В работе исследован характер изменчивости гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей с ростом высоты регистрации. Рассматривались условия повышенной и максимальной солнечной активности, когда процессы генерации плазменных пузырей наиболее активны. Для этого проведен детальный сравнительный анализ гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения плазменных пузырей, построенных по данным спутников на разных орбитальных высотах: ISS-b (~972–1220 км), Hinotog (~650 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~300–475 км) и CHAMP (~380–450 км). Установлено, что с ростом высоты наблюдения имеется заметная тенденция сдвига максимума вероятности наблюдения пузырей по местному времени. Так, если на высотах основания  $F$ -области максимум приходится на послезаходные (~20:30–22:00 LT) часы, то по мере роста высоты наблюдения он смещается к предполуночным (~21:00–24:00 LT, ~600 км), далее к послеполуночным (~01:00–03:00 LT, ~650 км) и, наконец, к предрассветным (~03:00–04:00 LT, ~972–1220 км) часам. Выявлено, что наиболее типичные скорости подъема экваториальных плазменных пузырей составляют ~150–300 м/с. Эти значения скорости соответствуют многочисленным наблюдательным данным.

DOI: 10.31857/S0016794020050144

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с пионерских исследований Woodman and La Hoz [1976] принято считать, 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. Причем развитие R–T неустойчивости является условием необходимым, но не достаточным. Для начала генерации требуется еще наличие “затравочного” возмущения плазмы (seeding plasma perturbation). Затравочные возмущения после захода Солнца, т.е. с развитием вечернего всплеска  $E \times B$  дрейфа, начинают эволюционировать и оформляться в плазменные пузыри. Согласно разным источникам, первые EPB появляются сразу после захода Солнца, т.е. после ~18:00 LT. Далее идет постепенное нарастание процессов генерации и затем после ~19:00 LT наблюдается их мощный всплеск. Как показывают многочисленные исследования (см., например, [Stolle et al., 2006; Kil and Heelis, 1998]) наиболее интенсивная генерация EPB на высотах основания  $F$ -области приходится на интервал 20:00–22:00 LT.

Следует указать, что приведенный выше сценарий развития EPB в зависимости от местного времени (LT) является наиболее общепринятым. Однако не так давно появились сообщения [Yizengaw et al., 2013; Smith and Heelis, 2017] с результатами, не вполне укладывающимися в рамки традиционной теории генерации EPB.

Авторы [Yizengaw et al., 2013; Smith and Heelis, 2017] исследовали картины LT-распределений вероятности наблюдения плазменных пузырей по данным спутника C/NOFS (~500 км), на борту которого производились измерения за 5 лет наблюдений (2009–2014 гг.), покрывающие минимум и максимум солнечной активности. Yizengaw et al. [2013], анализируя данные в годы с минимальным и умеренным уровнем солнечной активности (2009–2012 гг.), обнаружили, что в летние месяцы EPB наиболее часто регистрируются в послеполуночные часы. (Заметим, что рассматривались исключительно магнитоспокойные условия,  $Kp \leq 3$ .) Было высказано предположение о том, что R–T неустойчивость, приводящая к генерации EPB, может развиваться и в послеполуночные (!) часы. Модельные расчеты, проведенные авторами, также подтвердили это предполо-

жение. Другие авторы [Smith and Heelis, 2017] получили тот же результат по усредненным за год наблюдениям. Они показали, что по мере роста солнечной активности LT-интервал наблюдения максимального числа случаев ЕРВ постепенно смещается от послеполуночных к дополуночным часам, т.е. к тем часам, которые ранее считались традиционными для появления ЕРВ на указанных высотах.

Таким образом, на сегодняшний день имеются указания на четкую привязку характера LT-распределений вероятности наблюдения ЕРВ к фону солнечной активности. В этой связи в настоящей работе мы будем рассматривать только те случаи ЕРВ, которые получены в периоды приблизительно одного повышенного и максимального уровня солнечной активности, когда процессы генерации ЕРВ идут наиболее активно [Gentile et al., 2006].

Следует также указать, что в отношении характеристики “вероятность наблюдения ЕРВ в зависимости от LT”, привязанной к определенным геофизическим условиям, по-прежнему имеется ряд вопросов. Например, судя по имеющимся публикациям, недостаточно изучена изменчивость этой характеристики с ростом высоты наблюдения. Для интересующих нас условий (уровень повышенной и максимальной солнечной активности) логично предположить, что с ростом высоты регистрации ЕРВ интервал с максимальными значениями вероятности их наблюдений будет смещаться от послезаходных к предполуночным и далее к послеполуночным часам. Тем более что имеются указания (см., например, [Watanabe and Oya, 1986]), что с ростом высоты наблюдения эта тенденция определенно намечается (данные спутника Hinotori, ~650 км). Эту проблему планируется детально исследовать в настоящей работе.

Очевидно, что время массового появления ЕРВ на той или иной высоте верхней ионосферы будет зависеть от динамических характеристик вертикального подъема ЕРВ. Согласно литературным источникам, диапазон скоростей подъема ЕРВ довольно широк. Так, известно, что плазменные пузыри, как и вся экваториальная плазма, испытывают подъем и последующий вынос на высоты верхней ионосферы под влиянием  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа. Однако скорость подъема плазменного пузыря и скорость вертикального дрейфа ионосферной плазмы — это не одно и то же [Tsunoda et al., 1982]. Скорость вертикального дрейфа ионосферной плазмы отвечает за перемещение основного объема плазмы, а не отдельного пузыря, и она существенно меньше — 30–50 м/с. Дополнительное ускорение пузырям, как областям обедненной плазмы, придают силы плавучести. В результате пузыри устремляются на большие

высоты гораздо быстрее, чем окружающая плазма. Согласно ионозондовым [Abdu et al., 1983], спутниковым (AE-C, [McClure et al., 1977]) и радарным [Woodman and La Hoz, 1976] измерениям, скорости подъема пузыря могут составлять величину  $\geq 150$  м/с. Иными словами величина  $\sim 150$  м/с указывается как наименьшая скорость типичного случая. Что касается верхней границы возможного диапазона скоростей, то имеются сообщения о “быстрых” пузырях, поднимающихся со скоростями порядка  $\sim 1$  км/с [Hanson et al., 1997; Huba et al., 2008]. Такую скорость подъема развивают наиболее мощные структуры ЕРВ (пузыри с наибольшим плазменным обеднением), имеющие тенденцию “проявляться” в ранние часы вечернего сектора. Правда, не известна доля таких пузырей в общей массе всех генерируемых ЕРВ.

Таким образом, при указанном разбросе скоростей вертикального подъема трудно прогнозировать время появления ЕРВ на какой-либо высоте верхней ионосферы. В настоящей работе планируется уделить внимание и этому моменту — исследовать вопрос о наиболее типичных скоростях вертикального подъема ЕРВ.

Для выполнения поставленных задач будет проведен детальный сравнительный анализ гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения ЕРВ, регистрируемых на разных высотах. Для этого будут привлечены данные спутников ISS-b, Hinotori, ROCSAT-1, AE-E и CHAMP на разных орбитальных высотах в годы повышенной и максимальной солнечной активности.

## 2. МАТЕРИАЛЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Сводка данных, использованных в исследовании, представлена в табл. 1.

### 2.1. Экваториальные плазменные пузыри (ЕРВ) и экваториальное F-рассеяние (equatorial spread-F, ESF)

*а. Данные спутника ISS-b.* LT-распределение вероятности наблюдения ЕРВ ( $P_{ЕРВ}$ ) было получено по данным спутника ISS-b [RRL, 1983, 1985], летавшего в годы с высокой солнечной активностью (1978–1979 гг.,  $F10.7 \sim 150$ –220). Спутник ISS-b имел квазикруговую орбиту с наклоном  $\sim 70^\circ$  и покрывающую высоты верхней ионосферы ( $\sim 972$ –1220 км), (табл. 1).

Для построения LT-зависимости использовались наблюдения плазменных областей с пониженной концентрацией  $\text{He}^+$ . Согласно исследованиям, полученным нами ранее [Sidorova and Filippov, 2012; Сидорова и Филиппов, 2013], эти области, регистрируемые на высотах верхней ионосферы, можно интерпретировать как плаз-

**Таблица 1.** Сводка данных, используемых в сравнительном анализе

Публикация	Спутник	Параметр	LT-интервал	Высоты, км	Широты	Годы	$F_{10.7}$
Наше исследование	ISS-b	$P_{EPB}$	18:00–10:00	~972–1220	$\pm 50^\circ$ DIPLAT	1978–1979	150–220
Watanabe and Oya, 1986	Hinotori	$P_{B650}$	18:00–10:00	~650	$\pm 30^\circ$ DIPLAT	Февраль 1981– июнь 1982	~200
Su et al., 2006	ROCSAT-1	$P_{\sigma > 0.3\%}$	18:00–10:00	~600	$\pm 30^\circ$ DIPLAT; $\pm (30^\circ - 55^\circ)$ DIPLAT	1999–2004	107–181
Kil and Heelis, 1998	AE-E	$P_{\sigma > 1\%}$	18:00–10:00	~300–475	$\pm 40^\circ$ DIPLAT	1978–1980	~185
Stolle et al., 2006	CHAMP	$P_{ESF}$	18:00–10:00	~380–450	$\pm 30^\circ$ DIPLAT	2001–2004	107–181

менные пузыри экваториального происхождения (EPB). Для построения использовались лишь только те EPB (области с обедненной концентрацией  $He^+$ ), концентрация которых уменьшалась в два раза и более по отношению к фону.

Гистограмма  $P_{EPB}$  была построена в зависимости от LT с шагом в один час. Она была рассчитана по данным EPB за двухлетний период наблюдений (1978–1979 гг.,  $F_{10.7} \sim 150-220$ ) [RRL, 1983, 1985]. Использовались EPB данные магнито-спокойного и умеренно-возмущенного периодов ( $Kp \leq 3$ ), выявляемые по широтному интервалу  $\pm 50^\circ$  DIPLAT. Полученная гистограмма  $P_{EPB}$  приведена на рис. 1а.

Для расчета гистограммы рассматривались EPB данные из интервала 18–10 LT. Иными словами, регистрация EPB на высотах верхней ионосферы производилась со старта генерации EPB на высотах основания  $F$ -области. Это делалось намеренно с целью оценить долю “быстрых” пузырей, достигающих высот верхней ионосферы в первые послезакходные часы.

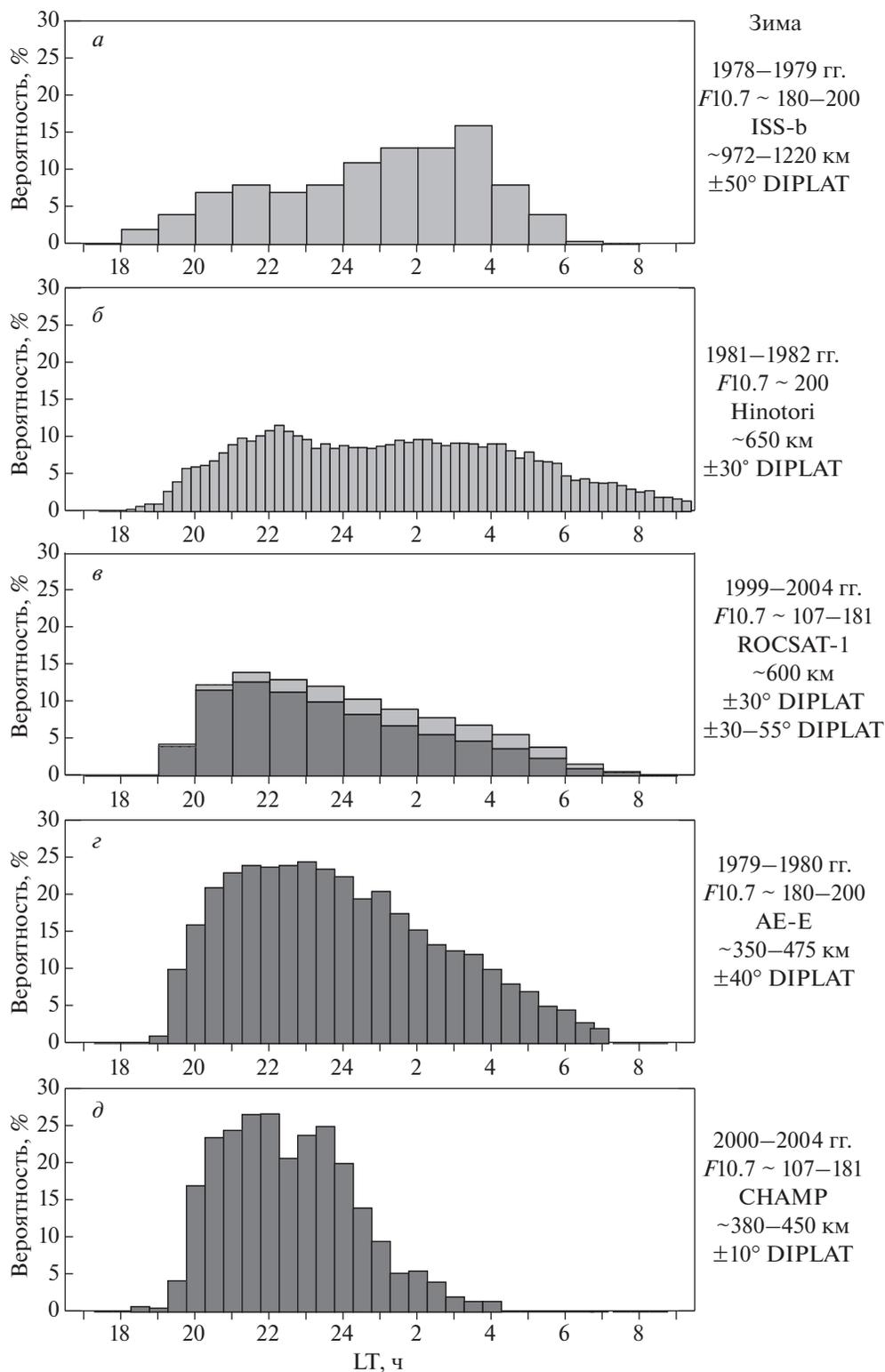
*б. Данные спутника Hinotori.* Для сравнительного анализа мы использовали гистограмму LT-распределения вероятности наблюдения EPB, полученную в работе [Watanabe and Oya, 1986] по данным спутника Hinotori. Известно, что спутник Hinotori был запущен на квазикруговую орбиту с высотой ~650 км в 1981 г. Структуры EPB выявлялись по флуктуациям ионной плотности ( $Ni$ ). Измерительные приборы спутника позволяли определять неоднородности размером от ~10 км до 1000 км.

Гистограмма распределения вероятности наблюдения EPB ( $P_{B650}$ ) была построена в зависимости от LT с шагом в 15 мин. Для расчета гистограммы  $P_{B650}$  использовались EPB данные, усредненные по широтному интервалу  $\pm 30^\circ$  DIPLAT. Значения  $P_{B650}$  были рассчитаны за период с февраля 1981 по июнь 1982 гг., когда наблюдался высокий уровень солнечной активности ( $F_{10.7} \sim 200$ ). Гистограмма  $P_{B650}$  показана на рис. 1б.

*в. Данные спутника ROCSAT-1.* В работе [Su et al., 2006] были представлены гистограммы LT-распределения вероятности наблюдения EPB, рассчитанные по данным спутника ROCSAT-1 в период высокой и максимальной солнечной активности (1999–2004 гг.,  $F_{10.7} \sim 107-181$ ). Известно, что спутник ROCSAT-1 имел квазикруговую орбиту с наклоном  $\sim 35^\circ$  и летал на высотах ~600 км. В работе рассматривались ионосферные неоднородности (EPB), выявляемые по флуктуации ионной плотности ( $Ni$ ) со значением  $\sigma > 0.3\%$ . Используемые измерительные приборы имели высокое пространственное разрешение, что позволяло регистрировать неоднородности размером от 7.5 до 75 км. Данные собирались по двум широтным интервалам:  $\pm 30^\circ$  DIPLAT (экваториальный регион) и  $\pm (30^\circ - 55^\circ)$  DIPLAT (среднеширотный регион). Для расчета использовались данные EPB, выявленные за пять лет наблюдений (1999–2004 гг.), покрывающих периоды повышенной и максимальной солнечной активности ( $F_{10.7} \sim 107-181$ ) (табл. 1).

Гистограммы  $P_{\sigma > 0.3\%}$  были построены в зависимости от LT с шагом в один час. Гистограмма, полученная для экваториального региона, показана на рис. 1в темным цветом. Гистограмма, полученная для среднеширотного региона, показана на рис. 1в светлым цветом (добавлена сверху к темным столбцам).

*г. Данные спутника AE-E.* Для сравнительного анализа была взята гистограмма LT-распределения вероятности наблюдения EPB, полученная Kil and Heelis [1998] по данным спутника AE-E (~300–475 км). EPB были выявлены по флуктуациям ионной плотности ( $Ni$ ). Для расчета использовались только те значения  $Ni$ , величина нормированного индекса которых ( $\sigma$ ) превышала 1%. (Напомним, что  $\sigma = \Delta Ni / \bar{N}i$ , где  $\bar{N}i$  – среднее значение фоновой ионной плотности, а  $\Delta Ni$  – стандартное отклонение фоновой ионной плотности.) Приборные характеристики и методика отбора данных, используемая в работе, позволяли



выявлять неоднородности размером от 100 до 1000 км.

Гистограмма распределения вероятности наблюдения ЕРВ ( $P_{\sigma > 1\%}$ ) была построена в зависи-

мости от LT с шагом в 30 мин. Для расчета  $P_{\sigma > 1\%}$  использовались ЕРВ данные, регистрируемые на высотах вблизи максимума слоя  $F_2$  ( $\sim 350\text{--}475$  км), на широтах  $\pm 40^\circ$  DIPLAT. Медианные значения

**Рис. 1.** Гистограммы распределения вероятностей наблюдения EPB (ESF), построенные в зависимости от местного времени (LT). (а) – Гистограмма  $P_{EPB}$ , полученная по данным спутника ISS-b. Значения  $P_{EPB}$  рассчитаны для полосы широт  $\pm 50^\circ$  DIPLAT, построены вдоль LT с шагом в один час. (б) – Гистограмма  $P_{B650}$ , полученная по данным спутника Hinotori [Watanabe and Oya, 1986]. Значения  $P_{B650}$  рассчитаны для полосы широт  $\pm 30^\circ$  DIPLAT, построены вдоль LT с шагом в 15 мин. (в) – Гистограммы  $P_{\sigma > 0.3\%}$ , полученные по данным ROCSAT-1 [Su et al., 2006]. Гистограммы  $P_{\sigma > 0.3\%}$  построены вдоль LT с шагом в один час. Значения  $P_{\sigma > 0.3\%}$ , полученные в экваториальном регионе ( $\pm 30^\circ$  DIPLAT), показаны столбцами темного цвета. Значения  $P_{\sigma > 0.3\%}$ , полученные в среднеширотном регионе ( $\pm(30^\circ-55^\circ)$  DIPLAT), показаны столбцами светлого цвета (добавлены сверху к темным столбцам). (г) – Гистограмма  $P_{\sigma > 1\%}$ , полученная по данным AE-E [Kil and Heelis, 1998]. Значения  $P_{\sigma > 0.1\%}$  рассчитаны для полосы широт  $\pm 40^\circ$  DIPLAT, построены вдоль LT с шагом в 30 мин. (д) – Гистограмма  $P_{ESF}$ , полученная по данным CHAMP [Stolle et al., 2006]. Значения  $P_{ESF}$  рассчитаны для полосы широт  $\pm 30^\circ$  DIPLAT, построены вдоль LT с шагом в 30 мин.

$P_{\sigma > 1\%}$  были рассчитаны за двухлетний период наблюдений (1978–1980 гг.), когда наблюдался повышенный уровень солнечной активности ( $F10.7 \sim 185$ ). Гистограмма  $P_{\sigma > 1\%}$  показана на рис. 1г.

д. *Данные спутника CHAMP.* Кроме того, для сравнительного анализа нами были привлечены результаты исследований, полученные Stolle et al. [2006] по данным магнитометрических измерений, проводимых на борту спутника CHAMP ( $\sim 380-450$  км). Для исследований использовался период 2001–2004 гг., характерный повышенным уровнем солнечной активности ( $F10.7 \sim 107-181$ ). По измерениям всплесков магнитного поля были получены данные об экваториальном  $F$ -рассеянии (ESF).

Следует указать, что такого типа ионосферные неоднородности (ESF) характеризуются малыми пространственными размерами (1–10 км) и представляют собой так называемый “шум”. События EPB, исследуемые нами, и регистрируемые события ESF тесно связаны между собой. Так, известно (см., например, [Aggson et al., 1992]), что поднимающийся вверх EPB сопровождается огромным числом мелко- и среднемасштабных неоднородностей, окружающих его подобно “галю”. Они тянутся за пузырьком в его кильватере в качестве “шумового шлейфа” или “шумового облака” [Woodman and La Hoz, 1976]. Считается, что регистрируемые в “шумовом облаке” ESF являются индикатором появления и развития EPB [Tsunoda, 1980; Abdu et al., 1983, 2000].

Гистограмма распределения вероятности наблюдения ESF ( $P_{ESF}$ ), построенная в зависимости от LT, представлена работе [Stolle et al., 2006] с шагом в 30 мин. Для расчета  $P_{ESF}$  использовались данные, усредненные по широтному интервалу  $\pm 30^\circ$  DIPLAT. Гистограмма  $P_{ESF}$  показана на рис. 1д.

### 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проведем детальный сравнительный анализ гистограмм LT-распределений вероятности EPB(ESF) (рис. 1), полученных на разных ионосферных высотах. Укажем, что EPB(ESF) данные, используемые для построения гистограмм, были получены в годы повышенной либо макси-

мальной солнечной активности, то есть при сходных гелиофизических условиях.

Выявлено, что на высотах генерации EPB(ESF), т.е. на высотах основания  $F$ -области, согласно данным спутникам CHAMP ( $\sim 380-450$  км) максимум вероятности наблюдения EPB(ESF) приходится на период  $\sim 20:30-22:00$  LT (рис. 1а). Далее следует небольшой локальный минимум и подъем значений ближе к  $\sim 23:00$  LT. После полуночи наблюдается довольно резкое падение значений вероятности с окончательным затуханием к  $\sim 04:00$  LT.

Чуть выше, т.е. на высотах выше  $F$ -максимума (данные спутника AE-E,  $\sim 350-475$  км) максимум вероятности наблюдения EPB сильно “расплывается” и приходится на интервал  $\sim 21:00-23:30$  LT (рис. 1б). Далее следует очень плавное падение значений вероятности с окончательным затуханием в утренние часы  $\sim 07:00$  LT.

К высоте  $\sim 600$  км (данные спутника ROCSAT-1) максимальные значения вероятности наблюдения EPB, по-прежнему, приходятся на период  $\sim 21:00-24:00$  LT (рис. 1в), однако последующее затухание происходит крайне плавно и завершается к  $\sim 09:00$  LT. Заметим, что указанная гистограмма (рис. 1в) является составной. Темные столбцы – это значения вероятности наблюдения EPB в экваториальном регионе ( $\pm 30^\circ$  DIPLAT). Светлые столбцы – это значения вероятности наблюдения EPB, выявленные в среднеширотном регионе ( $\pm(30^\circ-55^\circ)$  DIPLAT). Хорошо заметно, что светлые столбцы вносят вклад в усиление значений гистограммы вблизи полуночи и в послеполуночном секторе.

Отметим, что гистограммы, используемые при сравнении, мы не сравниваем между собой по абсолютным значениям. Полагаем, что такое сравнение некорректно, поскольку для построенной гистограмм использовались данные разных спутников, на борту которых применялись разные техники измерений. Более того, для определения структур EPB разные авторы применяли разные подходы и разные методы обработки данных.

Рост высоты регистрации EPB ( $\sim 650$  км, данные спутника Hinotori) приводит к существенным изменениям формы гистограммы вероятности наблюдения EPB. Помимо основного пика,

приходящегося на ~22:00 LT, начинает развиваться второй очень широкий максимум (рис. 1б), пока уступающий по значениям основному пику. Он начинает развиваться после полуночи, и его максимальные значения приходятся на период ~01:00–03:00 LT. Последующее затухание значений вероятности происходит крайне плавно и завершается к ~09:00 LT.

Наконец, на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км, данные спутника ISS-b) гистограмма претерпевает кардинальные изменения. Так, доминирующим максимумом вероятности наблюдения EPB становится максимум, развивающийся в послеполуночные часы (~03:00–04:00 LT) (рис. 1а). Однако небольшой подъем вероятности, как и ранее, по-прежнему имеет место в ~21:00–22:00 LT.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

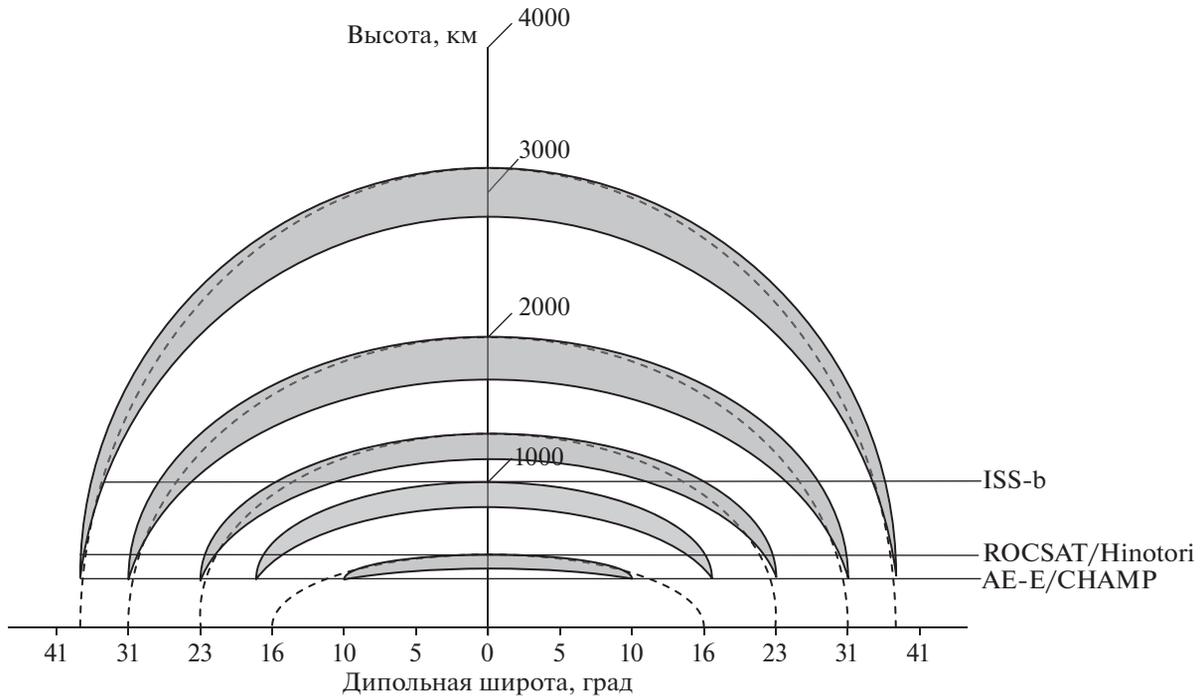
В результате детального сравнительного анализа гистограмм LT-распределений вероятности EPB (ESF) (рис. 1) было обнаружено, что по мере роста ионосферной высоты (высоты наблюдения) время появления максимума вероятности наблюдения плазменных пузырей постепенно смещается от предполуночных часов к послеполуночным и далее к предрассветным. Рассмотрим детали этой четко прослеживаемой тенденции.

Хорошо видно, что на высотах основания  $F$ -области пик вероятности приходится на ~20:30–22:00 LT (СНАМР, ~380–450 км) (рис. 1д). В этом случае максимум вероятности хорошо выражен: гистограмма имеет довольно резкий подъем и крутой спуск. Чем это можно объяснить?

Известно, что EPB формируются после захода Солнца под влиянием плазменной  $R$ – $T$  неустойчивости, развивающейся на высотах основания  $F$ -области. Для формирования EPB помимо  $R$ – $T$  неустойчивости требуется еще наличие затравочного возмущения плазмы. Затравочные возмущения после захода Солнца, т. е. с развитием вечернего всплеска  $E \times B$  дрейфа, начинают эволюционировать и оформляться в плазменные пузыри. Иными словами, на указанных высотах (~380–450 км) EPB только формируются, т. е. находятся на начальном этапе своего эволюционного развития и вертикального подъема. По этой причине пузыри еще слабо стратифицированы по скоростям вертикального подъема. Более того, в эту фазу развития они регистрируются строго в пределах экваториального региона, поскольку испытывают еще крайне незначительное диффузионное “растекание” вдоль магнитных силовых трубок. Как результат, их появление регистрируется как четкий максимум вероятности, который приходится на довольно узкий временной интервал (~20:30–23:30 LT).

По мере роста высоты наблюдения EPB начинают регистрироваться в более широком интервале ~21:00–01:00 LT. При этом форма максимума вероятности наблюдения EPB постепенно “размывается”: вершина становится более плоской, спуск становится более пологим и длинным (AE-E, ~350–475 км; ROCSAT-1, ~600 км) (рис. 1з, 1в). Очевидно, что на этом этапе развития EPB подпадают под влияние новых процессов. Например, на этих высотах очень существенным оказывается влияние зонального плазменного дрейфа. Он уносит пузыри в восточном направлении [Kil et al., 2009]. Часто наблюдается слияние нескольких EPB [Huang et al., 2011] либо раздвоение (бифуркация) отдельных пузырей [Narayanan et al., 2016]. Эти динамические процессы вносят свои поправки в скорости подъема EPB, приводя к их дифференциации. Наконец, в полную силу вступает процесс диффузионного “растекания” пузырей вдоль магнитных силовых трубок. Благодаря ему EPB могут регистрироваться не только в экваториальных, но и в низких, и даже на средних широтах. Напомним, что пузырь в результате эволюции приобретает бананообразный вид (рис. 2). На экваторе регистрируется его срединная (вершинная) часть, а в низких и на средних широтах регистрируются конечные части пузыря. По мере подъема вершинной части пузыря на большие высоты его концы будут достигать высот наблюдения, например, ~600 км с растущей задержкой по местному времени (LT) и уже на больших широтах (рис. 2). Как результат, на гистограмме LT-распределения EPB вместо четко выраженного максимума будет наблюдаться его сглаживание и удлинение участка пологого спуска гистограммы. Последнее будет свидетельствовать о росте случаев EPB, фиксируемых в полуночное и послеполуночное время.

Выше ~650 км (спутник Hinotori), как указывалось ранее, помимо основного пика, приходящегося на ~21:00–23:00 LT, начинает развиваться второй очень широкий максимум. Он поначалу проявляется в виде платообразного подъема (рис. 1б), значения которого пока еще сильно уступают по значениям основному дополуночному пику. Причем, нужно заметить, что этот послеполуночный максимум испытывает существенный сдвиг к утренним часам по мере роста высоты наблюдения. Так, если на высотах ~650 км (спутник Hinotori) он только начинает развиваться и становится заметным в виде плато в интервале ~01:00–03:00 LT (рис. 1б), то на высотах верхней ионосферы ~972–1220 км (спутник ISS-b) этот небольшой подъем превращается в доминирующий максимум и сдвигается к предрассветным часам ~03:00–04:00 LT (рис. 1а). Как же можно объяснить появление этого второго (послеполуночного) максимума?



**Рис. 2.** Схематическое изображение эволюции экваториальных плазменных пузырей относительно магнитных силовых линий, дипольной широты и высоты. Горизонтальными линиями показаны приблизительные высоты пролетов спутников ISS-b (~972–1220 км), Hinotori (~650 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~350–475 км) и CHAMP (~380–450 км).

По всей вероятности, в послеполуночные часы происходит накопление ЕРВ, достигших своих предельных (“потолочных”) высот верхней ионосферы. (Напомним, что “потолочная” высота (ceiling altitude) — это высота, где пузырь прекращает свой подъем, продолжает существовать там некоторое время как “застывший” (fossil bubble), а затем постепенно исчезает. Согласно теоретическим указаниям [Ott, 1978; Ossakov and Chaturvedi, 1978] потолочная высота плазменного пузыря определяется условием, при котором достигается равенство плазменных концентрации пузыря и внешней среды. Согласно Burke et al. [1979] пузыри в таком состоянии хорошо определяются даже на высотах ~3500 км.) Так, если вершина пузыря после нескольких часов подъема достигает своей потолочной высоты, например, ~2500 км, то половинки пузыря, опускаясь по силовой трубке, достигают высот спутниковых наблюдений, например, ~1000 км (ISS-b) на широте ~±25° DIPLAT и ~650 км (Hinotori) на широте ~±30° DIPLAT. Такой пузырь испытывает торможение и остается на несколько часов на указанной силовой трубке. В итоге, пузыри, остановившиеся у своих потолочных высот, начинают накапливаться. Последнее означает появление и постепенный рост второго максимума на гистограмме LT-распределения вероятности наблюдения ЕРВ.

Если оценить изменение положений выявленных максимумов в зависимости от LT и сопоставить с изменениями высоты регистрации ЕРВ (т.е. определить приблизительную высоту вершины пузыря), то нетрудно оценить возможные скорости вертикального подъема ЕРВ. Приблизительный расчет показывает, что скорости подъема находятся в диапазоне ~150–300 м/с. Укажем, что полученная оценка находится в хорошем согласии с наблюдательными данными наиболее типичных случаев всплывающих плазменных пузырей. Напомним, что согласно ионозондовым [Abdu et al., 1983], спутниковым (AE-C, [McClure et al., 1977]) и радарным [Woodman and La Hoz, 1976] измерениям эта скорость приблизительно равна или превышает 150 м/с.

Заметим, что в наблюдениях ЕРВ на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км, ISS-b) по-прежнему хорошо виден небольшой подъем вероятности в предполуночные часы (~20:00–22:00 LT), т.е. в первые часы после захода Солнца. Почему сохраняется первый пик?

Очевидно, что ЕРВ, дающие вклад в первый пик вероятности и выявленные по данным спутника ISS-b [RRL, 1983, 1985] как области обедненной концентрации He<sup>+</sup>, регистрируются исключительно в приэкваториальной области. Надо отметить, что эти ЕРВ, согласно данным ISS-b, распознаются с трудом, поскольку находятся в

области экваториального провала концентрации  $\text{He}^+$ . Однако даже те редкие случаи, что обнаруживаются в районе провала, дают определенный вклад в появление первого пика вероятности. Приблизительная оценка показывает, что достигают этих высот пузыри со скоростями подъема не выше  $\sim 200$  м/с, т.е. пузыри с самыми типичными скоростями.

Таким образом, можно ответить на поставленный ранее вопрос о типичных скоростях подъема ЕРВ. Оценка изменчивости LT-положений основных максимумов вероятности наблюдения ЕРВ показывает, что основную работу выполняют пузыри с типичными скоростями  $\sim 150\text{--}300$  м/с, а вклад “быстрых” и “медленных” ЕРВ менее значителен.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован характер изменчивости гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения ЕРВ с ростом высоты наблюдения. Рассматривались условия повышенной и максимальной солнечной активности, когда процессы генерации ЕРВ идут наиболее активно. Для этого проведен детальный сравнительный анализ гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения ЕРВ, выявленных по данным спутников ISS-b ( $\sim 972\text{--}1220$  км), Hinotori ( $\sim 650$  км), ROCSAT-1 ( $\sim 600$  км), AE-E ( $\sim 300\text{--}475$  км) и CHAMP ( $\sim 380\text{--}450$  км) на разных орбитальных высотах. Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Выявлено, что с ростом высоты наблюдения имеется заметная тенденция сдвига максимума вероятности регистрации ЕРВ по времени. Так, если на высотах основания  $F$ -области максимум вероятности наблюдения ЕРВ приходится на послезаходные ( $\sim 20:30\text{--}22:00$  LT) часы, то по мере роста высоты наблюдения он смещается к предполуночным ( $\sim 21:00\text{--}24:00$  LT,  $\sim 600$  км), далее к послеполуночным ( $\sim 01:00\text{--}03:00$  LT,  $\sim 650$  км) и, наконец, к предрассветным ( $\sim 03:00\text{--}04:00$  LT,  $\sim 972\text{--}1220$  км) часам.

2. Выявлено, что наиболее типичные скорости подъема ЕРВ составляют  $\sim 150\text{--}300$  м/с. Эти значения скорости соответствуют многочисленным наблюдательным данным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Долготная статистика плазменных “пузырей”, видимых на высотах верхней ионосферы в концентрации  $\text{He}^+$  // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 1. С. 64–77. 2013.

– Abdu M.A., de Medeiros R.T., Sobral J.H.A. et al. Spread  $F$  plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations // J. Geophys. Res. V. 88. P. 9197–9204. 1983.

– Abdu M.A., Sobral J.H.A., Batista I.S. Equatorial spread  $F$  statistics in the american longitudes: some problems relevant to ESF description in the IRI scheme // Adv. Space Res. V. 25. P. 113–124. 2000.

– Aggson T.L., Maynard N.C., Hanson W.B. et al. Electric field observations of equatorial bubbles // J. Geophys. Res. V. 97. P. 2997–3009. 1992.

– Burke W.J., Donatelli D.E., Sagalyn R.C. et al. Low density regions observed at high altitudes and their connection with equatorial spread  $F$  // Planet. Space. Sci. V. 27. P. 593–601. 1979.

– Gentile L.C., Burke W.J., Rich F.J. A climatology of equatorial plasma bubbles from DMSP 1989–2004 // Radio Sci. V. 41. N RS5S21. doi: 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005RS003340>

– Hanson W.B., Coley W.R., Heelis R.A. et al. Fast equatorial bubbles // J. Geophys. Res. V. 102. N A2. P. 2039–2045. 1997.

– Huang C.-S., de La Beaujardiere O., Roddy P.A. et al. Evolution of equatorial ionospheric plasma bubbles and formation of broad plasma depletions measured by the C/NOFS satellite during deep solar minimum // J. Geophys. Res. V. 116. A03309. 2011.  
<https://doi.org/10.1029/2010JA015982>

– Huba J.D., Joyce G., Krall J. Three-dimensional equatorial spread  $F$  modeling // Geophys. Res. Lett. V. 35. L10102. 2008  
<https://doi.org/10.1029/2008GL033509>

– Kil H., Heelis R.A. Global distribution of density irregularities in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 103. № A1. P. 407–417. 1998.

– Kil H., Heelis R.A., Paxton L.J. et al. Formation of a plasma depletion shell in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 114. A11302. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2009JA014369>

– McClure J.P., Hanson W.B., Hoffman J.F. Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 82. № 19. P. 2650–2656. 1977.

– Narayanan V.L., Gurubaran S., Shiokawa K. Direct observational evidence for the merging of equatorial plasma bubbles // J. Geophys. Res. V. 121. № 19. P. 7923–7931. 2016.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA02286>

– 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.

– Sidorova L.N., Filippov S.V. Topside ionosphere  $\text{He}^+$  density depletions: seasonal/longitudinal occurrence probability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 86. P. 83–91. 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.06.013>

– Smith J., Heelis R.A. Equatorial plasma bubbles: Variations of occurrence and spatial scale in local time, longitude, season, and solar activity // J. Geophys. Res. V. 122. № 5. P. 5743–5755. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024128>

– Stolle C., Lühr H., Rother M. et al. Magnetic signatures of equatorial spread  $F$  as observed by the CHAMP satellite //

- J. Geophys. Res. V. 111. № A02304. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005JA011184>
- *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>
- *Ott E.* Theory of Rayleigh–Taylor bubbles in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 83. № A5. P. 2066–2070. 1978.
- *Ossakov S.L., Chaturvedi P.K.* Morphological studies of rising equatorial spread F bubbles // J. Geophys. Res. V. 83. № A5. P. 2085–2090. 1978.
- *Tsunoda R.T.* Magnetic–field-aligned characteristics of plasma bubbles in the nighttime equatorial ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 42. P. 743–752. 1980.
- *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.
- *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. P. 125–131. 1986.
- *Woodman R.F., La Hoz C.* Radar observations of *F*-region equatorial irregularities // J. Geophys. Res. V. 81. P. 5447–5466. 1976.
- *Yizengaw E., Retterer J., Pacheco E.E. et al.* Postmidnight bubbles and scintillations in the quiet-time June solstice // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 1–6. 2013.  
<https://doi.org/10.1002/2013GL058307>