

УДК 550.388.2

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ИЗМЕНЧИВОСТЬ ШИРОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ВЫСОТОЙ

© 2021 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 22.11.2020 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Предметом исследования являются ионосферные плазменные неоднородности, известные как экваториальные плазменные пузыри (equatorial plasma bubbles). Изучена изменчивость широтных распределений вероятности наблюдения пузырей с ростом высоты наблюдения. Для этого использованы данные спутников ISS-b (~972–1220 км), ROCSAT-1 (~600 км) и AE-E (~300 км, ~350–475 км) на разных орбитальных высотах. Рассматривались разные сезоны в годы повышенной и максимальной солнечной активности. 1. Показано, что широтные распределения экваториальных плазменных пузырей на высотах их генерации в основных чертах повторяются на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км). Эта характеристика обнаружена благодаря тому, что на высотах верхней ионосферы пузыри регистрировались не по обеднению в суммарной ионной или электронной плотности, а как структуры с пониженной концентрацией в ионах гелия He^+ . 2. Обнаружено, что в широтных распределениях вероятности наблюдения пузырей с ростом высоты наблюдения (от ~600 км до ~1000 км) помимо центрального (экваториального) максимума развиваются дополнительные среднеширотные максимумы. Эта особенность наиболее ярко проявляется в обоих полушариях в периоды равноденствий и в зимних полушариях. 3. Выявлено, что положения среднеширотных максимумов сдвигаются к экватору с ростом высоты наблюдения. Это хорошо согласуется с пространственным (широтно-высотным) ходом магнитных силовых трубок, вдоль которых “вытянуты” плазменные пузыри, достигшие своих предельных высот.

DOI: 10.31857/S0016794021040167

1. ВВЕДЕНИЕ

В 70-х годах прошлого столетия началось интенсивное исследование ионосферных плазменных неоднородностей, развивающихся под влиянием ряда электродинамических процессов, характерных для экваториальных широт. На основе радарных [Woodman and La Hoz, 1976; Tsunoda, 1980], ионзондовых [Abdu et al., 1983] и спутниковых [McClure et al., 1977] измерений был выявлен класс неоднородностей с плазменной плотностью, пониженной по отношению к фоновой плотности от нескольких раз до нескольких порядков величины. Такие неоднородности могли достигать нескольких сотен километров в поперечном (восток–запад) сечении, тысяч километров в продольном (север–юг) сечении и подниматься до высот верхней ионосферы. Впоследствии эти неоднородности были названы экваториальными плазменными пузырями, equatorial plasma bubbles, (EPB).

Неоднократно на основе спутниковых и наземных наблюдений предпринимались попытки

получить широтные распределения вероятности наблюдения EPB на разных ионосферных высотах. Однако недостаточное количество измерений не позволяло получать уверенные выводы ни о широтных распределениях EPB, ни об их изменчивости с ростом высоты наблюдения [Abdu et al., 2000]. По этой причине проблема долгое время оставалась плохо изученной.

Например, по измерениям, проведенным в разные сезоны в годы повышенной солнечной активности, были получены широтные распределения EPB на высотах основания F -области (см., например, данные спутника AE-E, ~300–475 км) [Kil and Heelis, 1998]. Эти распределения были сравнены с широтными распределениями EPB, полученными на высотах ~600 км (спутник ROCSAT-1) [Su et al., 2006]. Было указано, что при базовом сходстве широтных гистограмм вероятности наблюдения EPB в области низких и экваториальных широт между ними все же имеются принципиальные различия, выявляемые на средних широтах [Su et al., 2006]. Так, на гисто-

Таблица 1. Сводка данных, используемых при сравнительном анализе

Публикация	Спутник	Параметр	LT-интервал	Высоты, км	Наклонение/ ограничение по широтам	Годы	$F_{10.7}$
Наше исследование	ISS-b	P_{EPB}	18:00–06:00	~972–1220	~70°/±60° DIPLAT	1978–1979	150–220
Su et al., 2006	ROCSAT-1	$P_{\delta} > 0.3\%$	18:00–06:00	~600	35°/±55° DIPLAT	1999–2004	107–181
Kil and Heelis, 1998	AE-E	$P_{\delta} > 1\%$	19:00–05:00	~300–475	19.7°/±40° DIPLAT	1978–1980	~185

Таблица 2. Сезонные периоды наблюдений

Публикация	ЗИМНЕЕ СОЛНЦЕСТОЯНИЕ	ВЕСЕННЕЕ РАВНОДЕНСТВИЕ	ЛЕТНЕЕ СОЛНЦЕСТОЯНИЕ	ОСЕННЕЕ РАВНОДЕНСТВИЕ
Наше исследование	Ноябрь–январь	Февраль–апрель	Май–июнь	Август–октябрь
Su et al., 2006	Декабрь	Март	Июнь	Сентябрь
Kil and Heelis, 1998	Ноябрь–январь	Февраль–апрель	Май–июль	Август–октябрь

граммах, характерных для высот ~600 км, помимо экваториального максимума вероятности появляются дополнительные среднеширотные пики вероятности. Авторы работы [Su et al., 2006] выдвинули предположение, что за появление среднеширотных пиков ответственны не EPB, а ионосферные плазменные неоднородности иной природы. Однако дальнейшего развития эта идея не получила.

С другой стороны, согласно результатам, полученным в работах [Sidorova and Filippov, 2012, 2014; Сидорова и Филиппов, 2013], EPB, выявляемые гораздо выше, т.е. на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км, спутник ISS-b), чаще всего регистрируются как раз в области средних широт. Согласно указанным исследованиям, EPB обнаруживаются на высотах верхней ионосферы как области с пониженной концентрацией ионов гелия He^+ и существуют там довольно продолжительное время [Сидорова и Филиппов, 2014].

Задача данной работы – провести детальный сравнительный анализ широтных распределений вероятности наблюдения EPB, регистрируемых на разных высотах. Для этого привлечены данные спутников ISS-b, ROCSAT-1, AE-E, летавших на разных орбитальных высотах в годы повышенной и максимальной солнечной активности.

2. ДАННЫЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

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

2.1. Экваториальные плазменные пузыри (EPB)

а. Данные спутника ISS-b. Широтные распределения вероятности наблюдения EPB (P_{EPB}) были получены по данным спутника ISS-b [RRL, 1983, 1985] в годы с высокой солнечной актив-

ностью (1978–1979 гг., $F_{10.7} \sim 150–220$). Спутник ISS-b имел квазикруговую орбиту с наклонением ~70° и покрывающую высоты верхней ионосферы (~972–1220 км), (табл. 1).

Для построения широтных зависимостей использовались наблюдения плазменных областей с пониженной концентрацией ионов гелия He^+ . Согласно исследованиям, проведенным нами ранее [Sidorova, 2007, 2008; Sidorova and Filippov, 2012; Сидорова и Филиппов, 2014], эти области, регистрируемые на высотах верхней ионосферы, можно интерпретировать как плазменные пузыри экваториального происхождения (EPB). Для построения использовались лишь только те EPB, концентрация которых уменьшалась в два раза и более по отношению к фону.

Широтные гистограммы P_{EPB} были построены для всех сезонов (зима, весна, лето, осень). Сезонные значения P_{EPB} рассчитывались как медианы за трехмесячный период наблюдений, центрированный относительно солнцестояний/равноденствий (табл. 2). Исключение составлял лишь летний сезон. Значения P_{EPB} были рассчитаны за два месяца наблюдений (май–июнь), поскольку данные за июль месяц отсутствовали.

Значения P_{EPB} были построены вдоль дипольных широт с шагом в 5°. Они были рассчитаны по данным о EPB за двухлетний период наблюдений (1978–1979 гг., $F_{10.7} \sim 150–220$) [RRL, 1983, 1985]. Использовались данные, полученные в магнитоспокойные и умеренно-возмущенные периоды ($Kp \leq 3$). Эти данные выявлялись по широтному интервалу ±60° DIPLAT за период 18–06 LT. Полученные гистограммы P_{EPB} приведены на рис. 1а–4а. На этих же рисунках приведено схематическое изображение выделенной магнитной силовой трубки. Она показана в виде дуги, построенной относительно высот и дипольных широт.

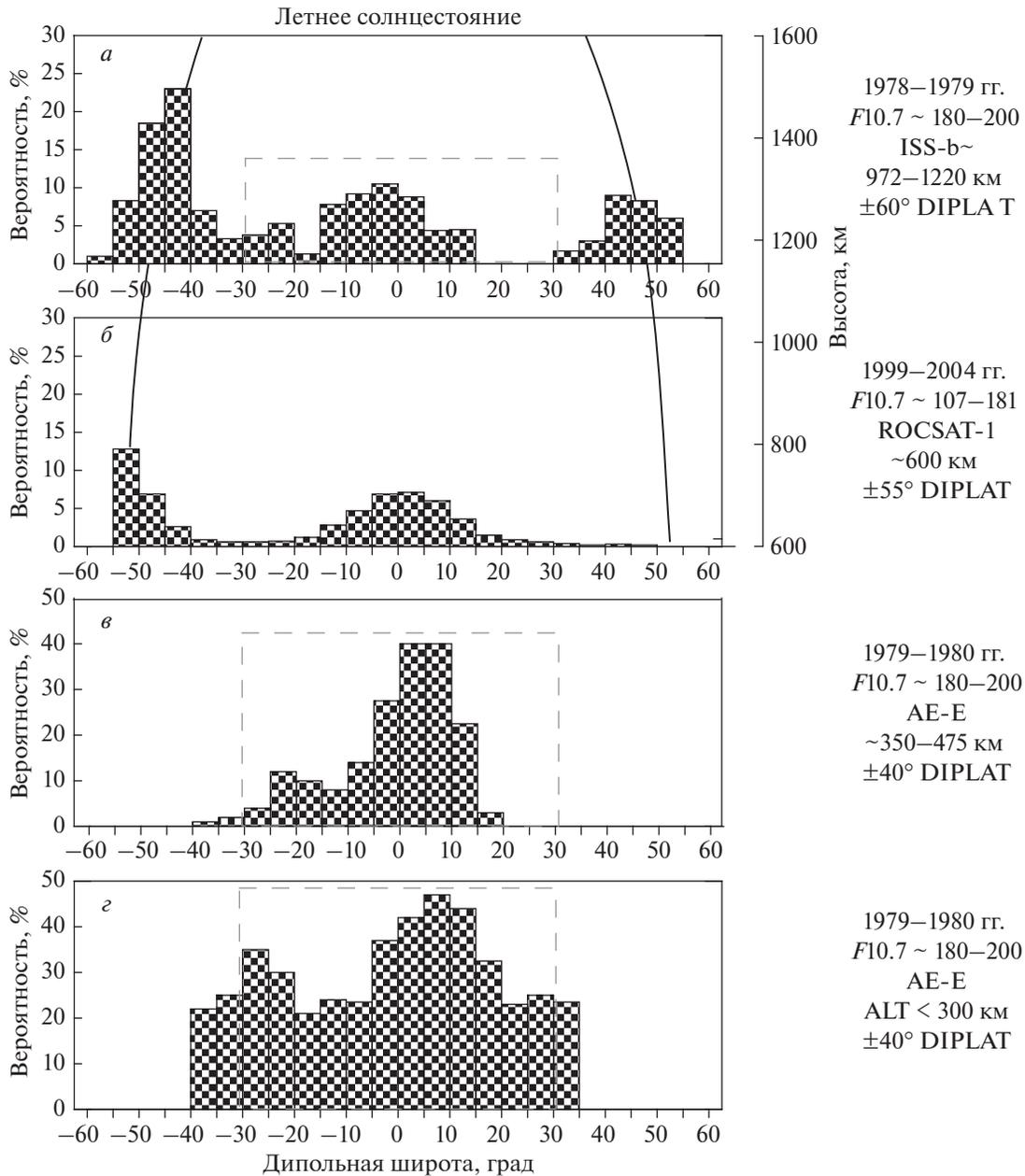


Рис. 1. Распределения вероятностей ЕРВ, построенные в зависимости от дипольной широты для летнего солнцестояния. Прямоугольниками выделены части гистограмм с характерным сходством в форме вариаций.
 (а) – Гистограмма $P_{ЕРВ}$, полученная по данным спутника ISS-b. Значения $P_{ЕРВ}$ рассчитаны для полосы широт $\pm 60^\circ$ DIPLAT и построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° . Схематическое изображение выделенной магнитной силовой трубки показано дугообразной кривой, построенной относительно высот (шкала справа) и дипольных широт.
 (б) – Гистограмма $P_{\delta > 0.3\%}$, полученная по данным ROCSAT-1 [Su et al., 2006]. Значения $P_{\delta > 0.3\%}$, получены для полосы широт $\pm 55^\circ$ DIPLAT и построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° . Части дуги представляют собой схематическое изображение выделенной магнитной силовой трубки, построенной относительно высот (шкала справа) и дипольных широт.
 (в) – Гистограмма $P_{\delta > 1\%}$, полученная по данным AE-E для высотного диапазона $\sim 350\text{--}475$ км [Kil and Heelis, 1998]. Значения $P_{\delta > 1\%}$ рассчитаны для полосы широт $\pm 40^\circ$ DIPLAT и построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° .
 (г) – Гистограмма $P_{\delta > 1\%}$, полученная по данным AE-E для высот ~ 300 км и несколько ниже [Kil and Heelis, 1998]. Значения $P_{\delta > 1\%}$ рассчитаны для полосы широт $\pm 40^\circ$ DIPLAT и построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° .

б. Данные спутника ROCSAT-1. В работе [Su et al., 2006] были представлены широтные распределения вероятности наблюдения ЕРВ, рассчитанные по данным спутника ROCSAT-1, полученным в

период высокой и максимальной солнечной активности (1999–2004 гг., $F_{10.7} \sim 107\text{--}181$). Известно, что спутник ROCSAT-1 имел квазикруговую орбиту с наклоением $\sim 35^\circ$ и высотой ~ 600 км.

В работе рассматривались ионосферные неоднородности (ЕРВ), выявляемые по флуктуации ионной плотности N_i . Для расчета использовались только те значения N_i , относительные отклонения которых ($\delta = \Delta N_i / \bar{N}_i$) превышали 0.3% ($\delta > 0.3\%$). Измерительные приборы, установленные на борту спутника, имели высокое пространственное разрешение, что позволяло регистрировать неоднородности размером от 7.5 до 75 км. Данные собирались в широтном интервале $\pm 55^\circ$ DIPLAT за период 18–06 LT. Для расчета использовались данные о ЕРВ, выявленные за пять лет наблюдений (1999–2004 гг.) (табл. 1). Гистограммы рассчитывались для каждого сезона за один характерный месяц наблюдения ЕРВ (месяц солнцестояния/равноденствия) (табл. 2).

Значения $P_{\delta > 0.3\%}$ были построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° . Полученные гистограммы $P_{\delta > 0.3\%}$ приведены на рис. 1б–4б. На этих же рисунках приведено схематическое изображение выделенной магнитной силовой трубки. Она показана в виде двух частей дуги, построенной относительно высот и дипольных широт.

в. Данные спутника АЕ-Е. Кроме того, для сравнительного анализа были использованы широтные распределения вероятности наблюдения ЕРВ, полученные Kil and Heelis [1998] по данным спутника АЕ-Е (~300–475 км). Структуры ЕРВ были выявлены по флуктуациям ионной плотности N_i со значением $\delta > 1\%$. Приборные характеристики и методика отбора данных, используемая в работе, позволяли выявлять неоднородности размером от 100 до 1000 км.

Гистограммы распределений вероятности наблюдения ЕРВ ($P_{\delta > 1\%}$) были построены вдоль дипольных широт с шагом в 5° . Данные были собраны в широтном интервале $\pm 40^\circ$ DIPLAT. Для расчета $P_{\delta > 1\%}$ использовались данные, взятые из интервала 19–04 LT в двух высотных регионах: ниже ~300 км и ~350–475 км. Медианные значения $P_{\delta > 1\%}$ были рассчитаны за двухлетний период наблюдений (1978–1980 гг.) с характерным повышенным уровнем солнечной активности ($F_{10.7} \sim 185$).

Значения $P_{\delta > 1\%}$ были рассчитаны для каждого сезона как медианные значения за трехмесячный период наблюдений, центрированный относительно солнцестояний/равноденствий (табл. 2). Указанные гистограммы представлены на рис. 1в, 2–4в, г.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проведем детальный сравнительный анализ широтных распределений вероятности ЕРВ (рис. 1–4), полученных на разных ионосферных высотах. Укажем, что данные о ЕРВ, используемые для расчета распределений, были получены в

годы повышенной либо максимальной солнечной активности, т.е. при сходных гелиофизических условиях. Следует также указать, что условия повышенной и максимальной солнечной активности наиболее благоприятны для генерации ЕРВ [Gentile et al., 2006].

Если рассматривать *периоды солнцестояний* (летнее, зимнее солнцестояния), то для широтных распределений вероятности наблюдения ЕРВ на высотах ниже ~300 км и на высотах ~350–475 км (АЕ-Е) характерно доминирование центрального экваториального максимума вероятности (рис. 1в–1г, рис. 2в–2г). В форме этого максимума наблюдается некоторая асимметрия: появляется боковой “лепесток” на широтах $-(20^\circ-30^\circ)$ DIPLAT в южном зимнем полушарии. Наиболее ярко это проявляется на высотах ниже ~300 км (рис. 1г, 2г). Очевидно, что ЕРВ чаще генерируются в зимнем полушарии, чем в летнем. Однако на высотах ~600 км (ROCSAT-1) этот эффект исчезает (рис. 1б–2б) и опять проявляется, но уже на высотах верхней ионосферы ~972–1220 км (ISS-b) (рис. 1а, 2а).

С другой стороны, на высотах ~600 км начинает проявляться иная особенность, а именно: в обоих полушариях в диапазоне широт $\pm(50^\circ-55^\circ)$ DIPLAT появляются дополнительные максимумы вероятности наблюдения ЕРВ. Эти среднеширотные максимумы испытывают значительный рост в распределениях ЕРВ, выявляемых на высотах ~972–1220 км (ISS-b) (рис. 1а, 2а). Хотя появляются они там уже не на прежних широтах, а на $\pm(45^\circ-50^\circ)$ DIPLAT, т.е. на широтах, слегка сдвинутых к экватору (рис. 1а, 2а). Причины этого сдвига будут обсуждаться в следующем разделе. Кроме того, хорошо видно, что среднеширотные максимумы больше по величине в зимнем полушарии, чем в летнем (рис. 1а, б–2а, б). Видно также, что на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км) они начинают доминировать по отношению к центральному экваториальному максимуму (рис. 1а–2а).

Заметим, что широтные распределения вероятности наблюдения ЕРВ, построенные на разных высотах, мы не сравниваем между собой по абсолютным значениям. Полагаем, что такое сравнение является не совсем корректным, поскольку для их построений использовались данные о ЕРВ, полученные от разных спутников, имеющих измерительные приборы, отличные друг от друга. Более того, для выявления структур ЕРВ в разных работах применялись разные подходы и методы обработки данных.

Если рассматривать *периоды равноденствий* (осеннее, весеннее равноденствия) (рис. 3–4), то для широтных распределений вероятности наблюдения ЕРВ на высотах ниже ~300 км и на высотах ~350–475 км (АЕ-Е) также характерно

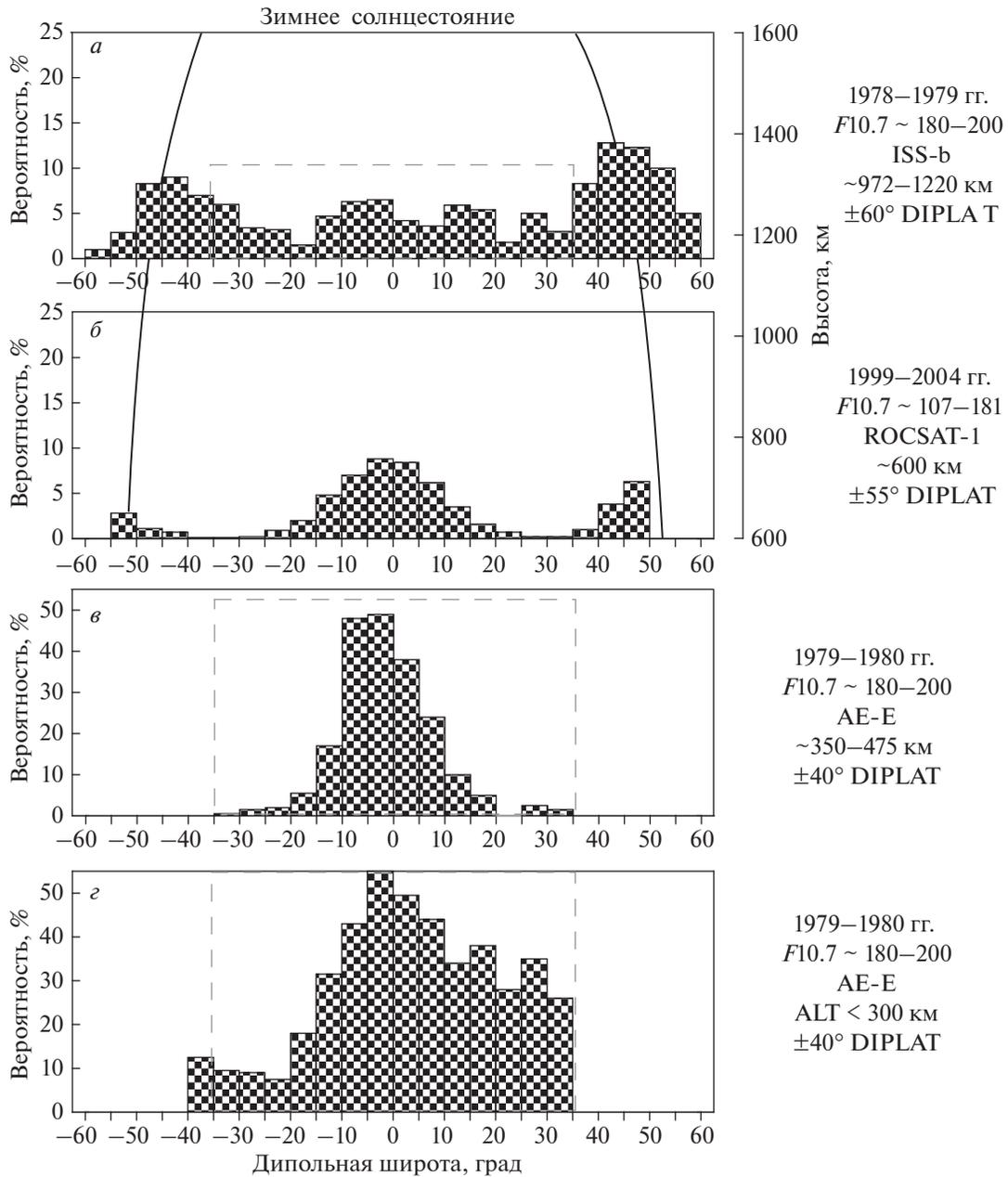


Рис. 2. То же, что на рис. 1, только для зимнего солнцестояния.

доминирование центрального экваториального максимума вероятности (рис. 3в–3г, 4в). Несколько выбивается из этой картины широтное поведение ЕРВ в весенний период на высотах ниже ~300 км (рис. 4г). Здесь помимо центрального экваториального максимума вероятности в низких широтах ±(20°–30°) DIPLAT развиваются боковые “лепестки” вероятности. Наиболее значительный “лепесток”, превалирующий над экваториальным максимумом, наблюдается в северном полушарии. Оба “лепестка” исчезают выше (рис. 4в–4б), т.е. на высотах ~350–475 км (AE-E) и ~600 км (ROCSAT-1).

Однако опять проявляются на высотах верхней ионосферы ~972–1220 км (ISS-b) (рис. 4а). Причины этого явления обсудим в следующем разделе.

И опять же, на высотах ~600 км (ROCSAT-1) помимо центрального экваториального максимума на широтах ±(50°–55°) DIPLAT появляются дополнительные среднеширотные максимумы (рис. 3б, 4б). Эти максимумы показывают значительный рост относительно центрального максимума на гистограммах, выявляемых на высотах ~972–1220 км (ISS-b) (рис. 3а, 4а). И, как указывалось выше, появляются они уже не на прежних

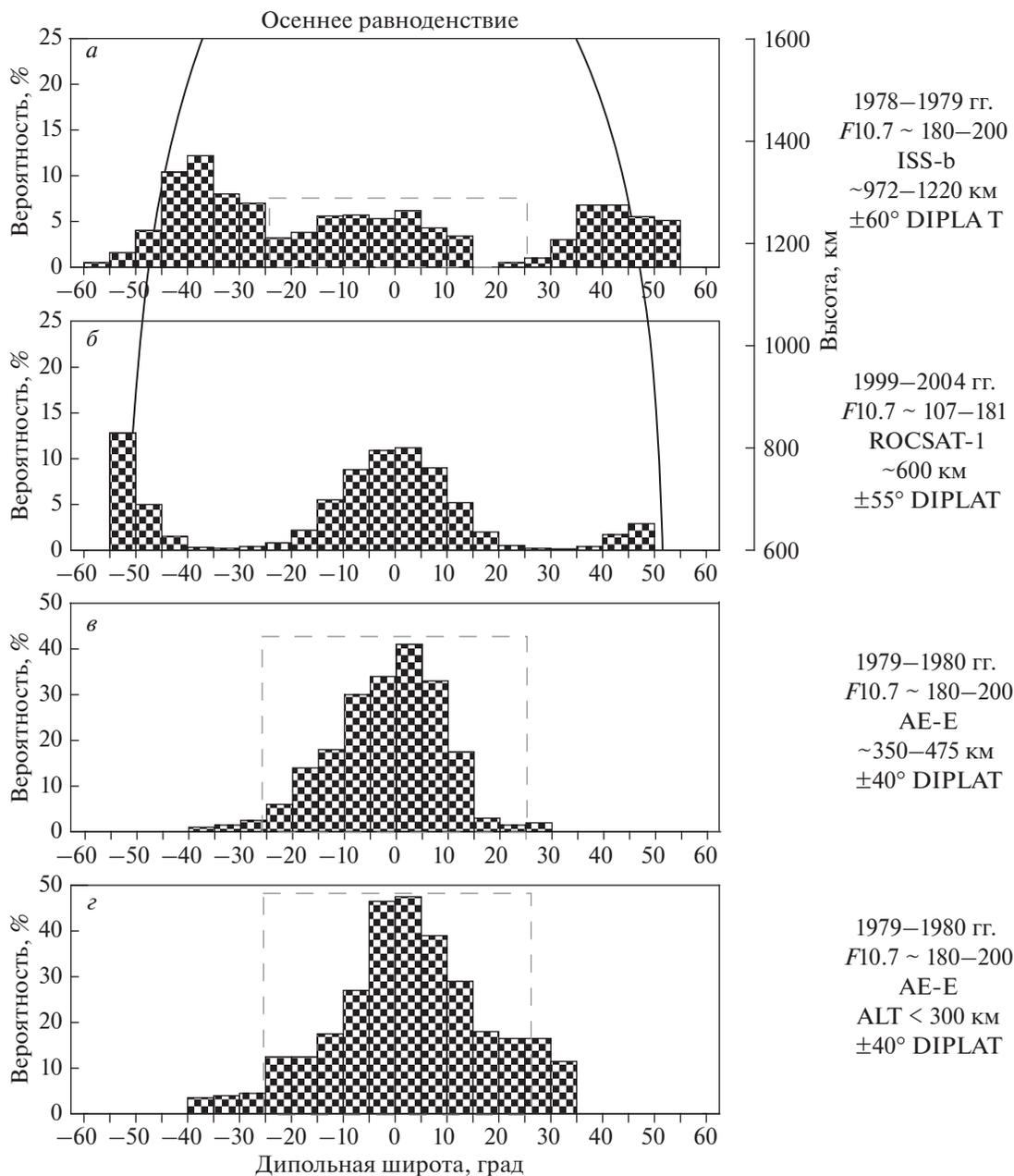


Рис. 3. То же, что на рис. 1, только для осеннего равноденствия.

широтах, а на широтах $\pm(45^\circ\text{--}50^\circ)$ DIPLAT, слегка сдвинутых к экватору (рис. 3а, 4а). Присутствует небольшая разница в величинах этих максимумов в разных полушариях, однако эта разница не так отчетливо выражена как в периоды солнцестояний.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В результате детального сравнительного анализа широтных распределений вероятности наблюдения ЕРВ в периоды солнцестояний и рав-

ноденствий было обнаружено, что по мере роста высоты наблюдения накапливается ряд существенных изменений в форме указанных гистограмм (рис. 1–4). Так, если в низких и экваториальных широтах еще может наблюдаться их базовое сходство, то на средних широтах у них появляются кардинальные различия. Рассмотрим эти тенденции и обсудим причины их развития.

Сначала проанализируем широтные распределения вероятности ЕРВ, полученные по данным спутника АЕ-Е на высотах ниже ~ 300 км и на высотах $\sim 350\text{--}475$ км (рис. 1в, 2–4в, 2).

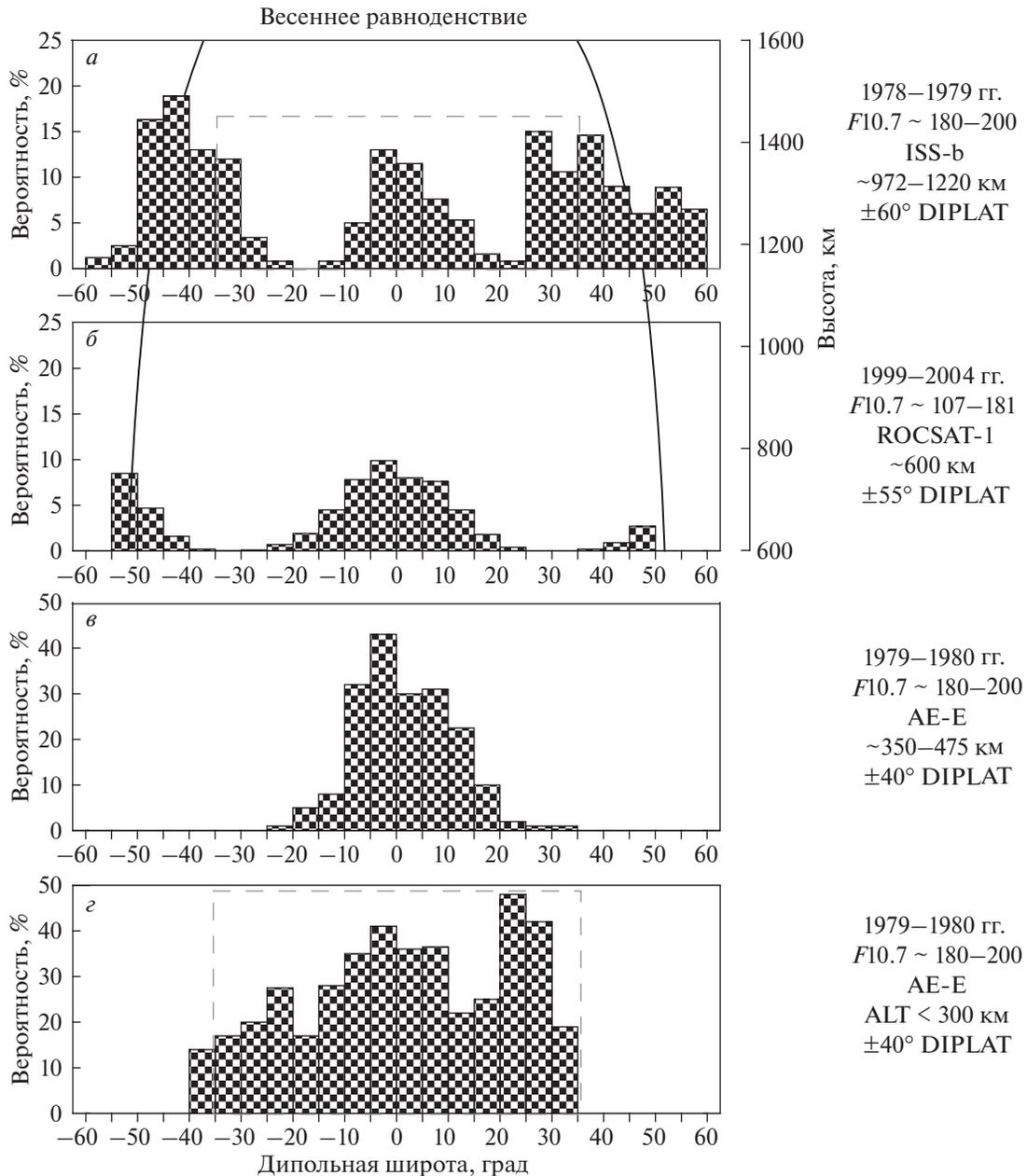


Рис. 4. То же, что на рис. 1, только для весеннего равноденствия.

Следует указать, что высоты вблизи ~300 км — это высоты основания *F*-области, где, как известно, зарождаются экваториальные плазменные пузыри. Известно, что EPB формируются после захода Солнца под влиянием плазменной неустойчивости Релея–Тейлора (R-T), развивающейся на высотах основания *F*-области. Для формирования EPB помимо R-T неустойчивости требуется еще наличие затравочных возмущений плазмы. Затравочные возмущения после захода Солнца, т.е. с развитием вечернего всплеска $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа, начинают эволюционировать и оформ-

ляться в плазменные пузыри (EPB). На высотах основания *F*-области (~300–400 км) EPB только формируются, т.е. находятся на начальном этапе своего эволюционного развития и вертикального подъема. В эту начальную фазу они, как видно из гистограмм (рис. 1з, 2з, 3з), регистрируются преимущественно над экватором. Правда, хорошо видно, что ширина экваториального максимума в отдельные сезоны может достигать довольно значительных размеров (до ±(25°–30°) DIPLAT). Это означает, что развивающиеся EPB могут регистрироваться не только над экватором, но в обла-

сти низких широт. Более того, при определенных условиях возможна их особенно усиленная генерация в районе низких широт, что приводит к появлению боковых “лепестков” вероятности (рис. 1з, 2з, 4з), которые порой превалируют над экваториальным максимумом (рис. 4з). Kil and Heelis [1998] указывают, что появление таких распределений ЕРВ однозначно связано с особенностями широтных распределений затравочных возмущений. А эти особенности могут возникать, например, под влиянием зональных и меридиональных термосферных ветров.

Согласно работам [Kudeki and Bhattacharyya, 1999; Hysell and Kudeki, 2004; Kudeki et al., 2007] ключевая роль в появлении затравочных возмущений отводится столкновительно-сдвиговой и ветровой неустойчивостям. Последние же развиваются, в первую очередь, под влиянием зональных термосферных ветров. Это подтверждается результатами численного моделирования. Кроме того, известно [Сидорова и Филиппов, 2018, 2019], что долготное распределение ЕРВ и долготный профиль отклонений скорости зонального западного термосферного ветра имеют детальное подобие и высокую степень корреляции ($R \cong 0.76$). Что касается влияния меридиональных (трансэкваториальных) ветров, то известно, что они в разные сезоны могут оказывать либо “разрешающее”, либо “запирающее” влияние на развитие ЕРВ в отдельных полушариях (см. например, [Abdu, 2001]), что может вносить особенности в широтные распределения ЕРВ низких широт. Таким образом, влияние термосферных ветров может приводить к появлению широтно-долготных зон с более или менее благоприятными условиями для генерации затравочных возмущений (ЕРВ).

Далее на больших высотах (~350–475 км) широтные распределения ЕРВ несколько изменяются (рис. 1в–4в). Сильно уменьшается вероятность наблюдения ЕРВ в низких широтах: экваториальный максимум становится более узким, одни боковые “лепестки” полностью исчезают (рис. 4в), другие сильно уменьшаются (рис. 1в–2в). По всей видимости, в действие вступают условия роста ЕРВ, которые отсеивают часть стартовых пузырей [Kil and Heelis, 1998]. Отсев низкоширотных ЕРВ еще более усиливается при подъеме на высоты ~600 км (ROCSAT-1) (рис. 1б–4б). Однако, так ли это? Ведь боковые “лепестки” опять появляются на гистограммах широтного распределения ЕРВ высот верхней ионосферы (~972–1220 км) (рис. 1а–4а). (На рисунках 1–4 обсуждаемые широтные распределения ЕРВ, полученные в экваториальной области и прилегающих низких широтах, выделены прямоугольниками.) Вернемся к обсуждению этого явления чуть позже.

При подъеме пузыря на большие высоты благодаря влиянию амбиполярной диффузии проис-

ходит “растекание” пузыря вдоль магнитных силовых трубок. Как результат, пузырь приобретает бананообразный вид (рис. 5). И в таком виде пузырь может регистрироваться не только в экваториальных, но и в низких широтах и даже на средних широтах (рис. 1а, б–4а, б). Например, из рис. 5 хорошо видно, что серединная (вершинная) часть поднимающегося пузыря регистрируется над экватором, а его концы регистрируются в низких либо средних широтах. Причем, требуется указать, что может регистрироваться непосредственно сам пузырь (его фрагмент) либо “облако” более мелкомасштабных “шумовых” плазменных неоднородностей (т. н. экваториальное F -расщепление (equatorial spread F , ESF)), окружающее/сопровожающее этот пузырь [Tsunoda, 1980; Abdu et al., 1983, 2000; Aggson et al., 1992].

Действительно, при подъеме вершины пузыря на высоты верхней ионосферы он может регистрироваться даже на средних широтах (рис. 5). Причем, на первый взгляд, этот процесс должен отражаться на картинах широтного распределения ЕРВ как монотонно затухающий. Ведь по мере подъема количество пузырей, “прорывающихся” на большие высоты, существенно убывает. С одной стороны, это хорошо видно по широтным распределениям ЕРВ, регистрируемым в низких и экваториальных широтах. Они с ростом высоты наблюдения становятся менее выраженными (данные спутников АЕ-Е и ROCSAT-1). С другой стороны, на тех же гистограммах в противовес указанному процессу начинают развиваться среднеширотные максимумы вероятности ЕРВ (рис. 1б–4б). На высоте ~600 км (рис. 1б–4б) эти максимумы появляются на широтах $\pm(50^\circ-55^\circ)$ DIPLAT. Выше, т.е. на высотах ~972–1220 км (рис. 1а–4а), они становятся более значительными и слегка смещаются к экватору $\pm(45^\circ-50^\circ)$ DIPLAT. Резонно возникает вопрос: почему в широтном распределении вероятности наблюдения ЕРВ помимо очевидного экваториального максимума возникают эти дополнительные среднеширотные максимумы?

Известно, что на высотах верхней ионосферы ЕРВ начинают достигать своих предельных (“потолочных”) высот. (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 одним теоретическим указаниям [Ott, 1978; Ossakov and Chaturvedi, 1978] потолочная высота плазменного пузыря определяется условием, при котором достигается равенство плазменных концентраций пузыря и внешней среды. Так, пузыри как области с истощением в концентрации N_e (N_i) определялись даже на высотах ~3500 км [Burke et al., 1979]. Однако согласно более поздним теоретическим исследованиям (см., напри-

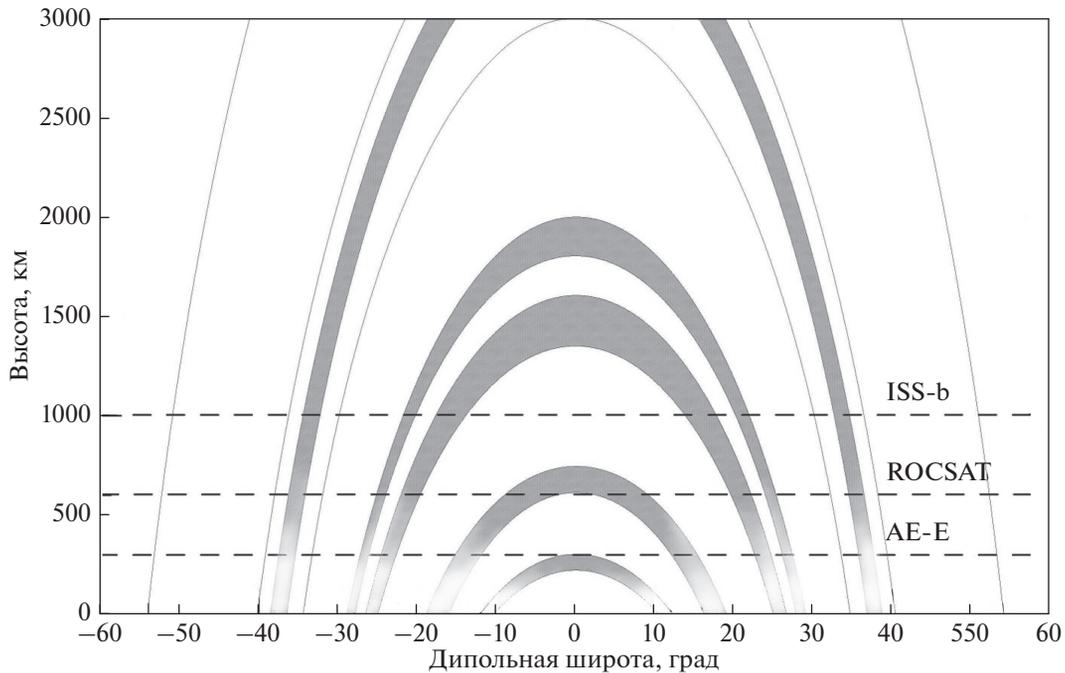


Рис. 5. Схематическое изображение эволюции экваториальных плазменных пузырей относительно магнитных силовых трубок, дипольной широты и высоты. Горизонтальными линиями показаны приблизительные высоты пролетов спутников ISS-b (~972–1220 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~300 км, ~350–475 км).

мер, [Huba et al., 2008; Krall et al., 2010]) для остановки пузыря требуется достижение равенства суммарной ионной массовой плотности ($\rho(Ni)$) пузыря и окружающей плазмы. До тех пор, пока существует этот дисбаланс, пузырь остается “живым”: продолжает подниматься, достигая своих потолочных высот, которые могут превышать ~3500 км.) Так, например, если вершина пузыря после нескольких часов подъема достигает своей потолочной высоты, например, ~3000 км (рис. 5), то половинки пузыря, опускаясь по силовой трубке, достигают высот спутниковых наблюдений, например, ~1000 км (ISS-b) на широте $\sim \pm 30^\circ$ DIPLAT и ~600 км (ROCSAT-1) на широте $\sim \pm 33^\circ$ DIPLAT. 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, начинают накапливаться. Последнее означает появление дополнительных среднеширотных максимумов вероятности наблюдения ЕРВ на высотах спутника ROCSAT ~600 км (рис. 1б–4б) и постепенный рост этих максимумов на высотах ISS-b ~972–1220 км (рис. 1а–4а). Причем небольшой широтный сдвиг этих максимумов к экватору с ростом высоты наблюдения связан исключительно с пространственным (широтно-высотным) ходом магнитной силовой трубки. (Ход выделенной магнитной силовой трубки показан дугообразны-

ми кривыми на рис. 1а, б–4а, б). А то, что на высотах ~972–1220 км эти максимумы становятся более выраженными, на первый взгляд, можно объяснить тем, что с ростом высоты наблюдения накапливается все большее количество ЕРВ, достигших своих потолочных высот (рис. 1а–4а). Однако это не так однозначно. Это станет ясно из дальнейшего обсуждения.

Вернемся к обсуждению сходства широтных картин вероятности наблюдения ЕРВ, проявляющегося в повторении боковых “лепестков” у экваториального максимума. Это сходство было обнаружено в гистограммах, построенных по данным о ЕРВ, выявленным на высотах ~300 км и ~972–1220 км. Однако оно значительно ухудшалось либо вообще отсутствовало на промежуточных высотах — ~350–475 км и ~600 км.

Как указывалось ранее, по данным спутника ISS-b (~972–1220 км) структуры ЕРВ выявляются как плазменные области с обедненной концентрацией в ионах гелия He^+ , т.е. ЕРВ выявляются по флуктуации одной ионной составляющей. По данным же спутников AE-E и ROCSAT-1 структуры ЕРВ выявляются по флуктуации суммарной ионной плотности (Ni). В суммарной ионной плотности основную (доминантную) долю составляют ионы кислорода O^+ . Хорошо известно, что в рассматриваемом диапазоне высот (~300–600 км) фоновая концентрация O^+ неуклонно убывает с ростом высоты (см., например, [Брю-

нелли, Намгаладзе, 1998]). Это приводит ко все более затрудненному выявлению структуры ЕРВ по параметру $Ni(O^+)$, поскольку по мере подъема пузыря постепенно происходит выравнивание обедненной концентрации $Ni(O^+)$ внутри пузыря и фоновой концентрации O^+ окружающей ионосферной плазмы. Растущие проблемы в регистрации ЕРВ приводят к исчезновению деталей в картинах широтного распределения вероятности ЕРВ (рис. 1б, в–4б, в). Наконец, ЕРВ, достигающие высот верхней ионосферы (~972–1220 км), становятся плохо различимы, если их пытаться выявить по суммарной ионной плотности Ni либо по электронной концентрации Ne ($Ne \cong Ni$). Так, по данным спутника ISS-b пузыри как области с обедненной плотностью Ne были “видны” всего лишь в 3% пролетов (46 случаев на 1700 пролетов спутника) [Miyama and Matuura, 1980]. Однако по данным того же спутника они хорошо выявлялись по минорной ионной компоненте He^+ [Sidorova, 2007, 2008; Сидорова, 2008]. (Напомним, что минорная концентрация ионов He^+ , входящих в ионный состав плазменного пузыря, определяется концентрацией He^+ на высотах образования плазменного пузыря. 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 высотах основания F -области составляла $(0.25–3) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$.) Иными словами, пузырь становится “виден” на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км) 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. Имеются численные расчеты, согласно которым такие структуры ЕРВ являются довольно устойчивыми [Сидорова и Филиппов, 2014].

Следует указать, что именно по этой причине широтная картина вероятности наблюдения ЕРВ, зафиксированная в экваториальных и низких широтах на высотах генерации плазменных пузырей (~300 км), в основных чертах повторяется на тех же широтах на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км). Именно по этой причине, а не по причине отсева части стартовых пузырей, эта картина предстает “смазанной” на высотах ~350–475 км и полностью теряет детали на промежуточных высотах (~600 км).

В этом свете легко проанализировать и ранее указанную особенность в широтных распределениях ЕРВ: значительный рост величин средне-

широтных максимумов по отношению к центральному экваториальному максимуму либо их доминирование на высотах ~972–1220 км (рис. 1а–4а). Это связано с тем, что на высотах верхней ионосферы широтный ход фоновой концентрации в ионах гелия He^+ имеет глубокий экваториальный провал (падение концентрации в 5 раз и более), а гребни этого распределения располагаются на широтах $\pm(20^\circ–40^\circ)$ DIPLAT [Taylor et al., 1970; Chandra et al., 1970; Chandra, 1975]. Соответственно, в области экваториального провала в концентрации He^+ обнаружение ЕРВ затруднено из-за малой разницы фоновой концентрации He^+ и концентрации ионов гелия внутри пузыря. (Например, особенно плохо выявляется экваториальный максимум зимой (рис. 2а).) И, наоборот, в области гребней этого провала ЕРВ выявляются наиболее легко, поскольку разница фоновой концентрации и концентрации He^+ внутри пузыря значительна.

Следует указать на особенности широтных распределений вероятности наблюдений ЕРВ в разные сезоны.

Если рассматривать периоды *солнцестояния* (летнее, зимнее солнцестояния) (рисунки 1, 2), то видно, что на высотах у основания F -области (~300 км и ~350–475 км) форма центрального экваториального максимума вероятности ЕРВ имеет довольно ярко выраженную широтную асимметрию. Ширина пика наиболее велика и имеет детали (боковые “лепестки”) в зимних полушариях, например, летом в южном полушарии и зимой в северном полушарии (рис. 1в, г–2в, г). Это означает, что в зимних полушариях создаются более благоприятные условия для развития плазменных пузырей, чем в летних. Более того, на высотах верхней ионосферы (~600 км и ~972–1220 км) появляющиеся дополнительные среднеширотные максимумы вероятности испытывают наибольший рост опять же в зимних полушариях (рис. 1а, б–2а, б). Эти результаты хорошо согласуются с известными сезонными особенностями наблюдения ЕРВ. Так, согласно результатам [Gentile et al., 2006], полученным по данным спутников DMSP (~848 км) в годы повышенной солнечной активности (1989–1992 гг.), плазменные пузыри наиболее часто появляются в зимнее время, а также весной и осенью. В летние же месяцы их развитие наиболее затруднено. Это легко проиллюстрировать, если снова обратиться к рис. 5. Получается, что в зимних полушариях создаются наиболее благоприятные условия для развития фрагментов (концов) поднимающихся пузырей и, наоборот, развитие пузырей (их фрагментов) сильно подавляется в летних полушариях.

Для периодов *равноденствия* (осеннее, весеннее равноденствия) (рис. 3–4) в широтном распределении ЕРВ на высотах у основания F -области

(~300 км и ~350–475 км) также характерно доминирование центрального экваториального максимума вероятности (рис. 3в, з–4в, з). Выше (~600 км, ~972–1220 км) развиваются дополнительные среднеширотные максимумы (рис. 3а, б–4а, б). На высотах ~972–1220 км между величинами среднеширотных максимумов, регистрируемых в разных полушариях, наблюдается небольшая разница. Однако эта разница не столь велика по сравнению с той, что наблюдалась в периоды солнцестояний. И это хорошо согласуется с тем, что, как известно [Gentile et al., 2006], в периоды равноденствий в обоих полушариях имеют место приблизительно одинаковые условия для развития и эволюции ЕРВ.

Итак, можно заключить, что выявленная изменчивость широтных распределений ЕРВ с ростом высоты наблюдения находит свое логичное объяснение в рамках общепринятого механизма генерации и эволюции экваториальных плазменных пузырей. Обнаруженные сезонные особенности в ходе широтных распределений ЕРВ находятся в хорошем согласии с ранее известными сезонными характеристиками наблюдения ЕРВ. Однако наиболее важным результатом настоящего исследования является тот факт, что картины широтного распределения ЕРВ, регистрируемые на высотах генерации ЕРВ в экваториальных и низких широтах, в основных чертах повторяются на высотах верхней ионосферы. Это было выявлено благодаря тому, что регистрация ЕРВ на высотах верхней ионосферы производилась не традиционным образом – по суммарной ионной Ni или электронной Ne плотности, а по минорной ионной компоненте – ионам гелия He^+ .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован характер изменчивости широтных распределений вероятности наблюдения ЕРВ с ростом высоты наблюдения. Исследования проводились для разных сезонов в годы повышенной и максимальной солнечной активности. Для этого проведен детальный сравнительный анализ гистограмм широтных распределений вероятности наблюдения ЕРВ, выявленных по данным спутников ISS-b (~972–1220 км), ROCSAT-1 (~600 км) и АЕ-Е (~300–475 км) на разных орбитальных высотах. Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Выявлено, что картины широтного распределения ЕРВ, регистрируемые на высотах генерации плазменных пузырей в экваториальных и низких широтах, в основных чертах повторяются на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км). Эта особенность обнаружена благодаря тому, что на высотах верхней ионосферы ЕРВ регистрировались не по обеднению в суммарной ионной Ni

или электронной Ne плотности, а как структуры с пониженной концентрацией в ионах гелия He^+ .

2. Выявлено, что с ростом высоты наблюдения (от ~600 км до ~1000 км) в широтных распределениях вероятности ЕРВ помимо центрального (экваториального) максимума развиваются дополнительные среднеширотные максимумы вероятности. Эта особенность наиболее ярко проявляется в обоих полушариях в периоды равноденствий и в зимних полушариях.

3. Обнаружено, что положения среднеширотных максимумов вероятности наблюдения ЕРВ сдвигаются к экватору с ростом высоты наблюдения. Это хорошо согласуется с пространственным (широтно-высотным) ходом магнитных силовых трубок, вдоль которых “вытянуты” ЕРВ, достигшие своих потолочных высот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 499 с. 1998.
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные “пузыри” на высотах верхней ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 48. № 1. С. 60–69. 2008.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Долготная статистика плазменных “пузырей”, видимых на высотах верхней ионосферы в концентрации He^+ // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 53. № 1. С. 64–77. 2013.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Регистрация плазменных “пузырей” на высотах верхней ионосферы: численные оценки // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 3. С. 355–364. 2014.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Экваториальные плазменные “пузыри”: Влияние термосферных ветров, модулированных приливной волной DE3 // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 2. С. 225–233. 2018.
- Сидорова Л.Н., Филиппов С.В. Ветровая подготовка генерации экваториальных плазменных “пузырей” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 59. № 3. С. 333–339. 2019. <https://doi.org/10.1134/s0016794019030131>
- 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.
- 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.
- 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. № RS521. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005RS003340>
- *Chandra S., Troy B.E., Jr., Donley J.L. et al.* “OGO-4” Observations of Ion Composition and Temperatures in the Topside Ionosphere // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 75. № 19. P. 3867–3878. 1970.
- *Chandra S.* The equatorial helium ion trough and the geomagnetic anomaly // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 37. № 2. P. 359–367. 1975.
- *Heelis R.A., Hanson W.B., Bailey G.J.* Distributions of He⁺ at middle and equatorial latitudes during solar maximum // *J. Geophys. Res.* V. 95. № A7. P. 10313–10320. 1990.
- *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>
- *Hysell D.L., Kudeki E.* Collisional shear instability in the equatorial *F* region ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 109. № A11301. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010636>
- *Kil H., Heelis R.A.* Global distribution of density irregularities in the equatorial ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A1. P. 407–417. 1998.
- *Krall J., Huba J.D., Ossakow S.L., Joyce G.* Why do equatorial ionospheric bubbles stop rising? // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. № L09105. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010GL043128>
- *Kudeki E., Bhattacharyya S.* Postsunset vortex in equatorial *F*-region plasma drifts and implications for bottomside spread-*F* // *J. Geophys. Res.* V. 104. № 12. P. 28163–28170. 1999.
- *Kudeki E., Akgiray A., Milla M.A., Chau J.L., Hysell D.L.* Equatorial spread-*F* initiation: post-sunset vortex, thermospheric winds, gravity waves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. № 17–18. P. 2416–2427. 2007.
- *Maryama T., Matuura N.* Global distribution of occurrence probability of spread echoes based on ISS-b observation // *J. Radio Res. Lab.* V. 27. № 124. P. 201–216. 1980.
- *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.
- *Ossakow S.L., Chaturvedi P.K.* Morphological studies of rising equatorial spread *F* bubbles // *J. Geophys. Res.* V. 83. № A5. P. 2085–2090. 1978.
- *Ott E.* Theory of Rayleigh–Taylor bubbles in the equatorial ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 83. № A5. P. 2066–2070. 1978.
- *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.* Plasma bubble phenomenon in the topside ionosphere // *Adv. Space Res. Special issue (COSPAR).* 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.03.067>
- *Sidorova L.N.* Topside plasma bubbles, seen as He⁺ density depletions // *Fundamental Space Research. Conference Proceedings.* Sunny Beach, Bulgaria. P. 238. 21–28 September, 2008.
- *Sidorova L.N., Filippov S.V.* Topside ionosphere 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>
- *Sidorova L.N., Filippov S.V.* Plasma bubbles in the topside ionosphere: estimations of the survival possibilities // *J. Atmos. Solar-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>
- *Taylor H.A., Jr., Mayr H.G., Brinton H.C.* Observations of hydrogen and helium ions during a period of rising solar activity // *Space Res.* X. V. 10. P. 663–678. 1970.
- *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.
- *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.* V. 108. № A12. 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. P. 5447–5466. 1976.