

УДК 550.388.2

ДОЛГОТНАЯ СТАТИСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ “ПУЗЫРЕЙ”, ВИДИМЫХ НА ВЫСОТАХ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ В КОНЦЕНТРАЦИИ He^+

© 2013 г. Л. Н. Сидорова, С. В. Филиппов

ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: lsid@izmiran.ru

Поступила в редакцию 9.09.2010 г.

После доработки 28.06.2011 г.

Идея экваториального происхождения плазменных областей пониженной концентрации He^+ (или субпровалов) подвергнута новой проверке. Для этого проведен детальный сравнительный анализ долготных вариаций вероятности их наблюдения в разных полушариях с вариациями вероятности наблюдения экваториальных неоднородности F -области (EFI), экваториального F -рассеяния (RFS, EFS) и экваториальных плазменных “пузырей” (EPB). С поправкой на сезонную зависимость и особенности хода магнитного поля в разных полушариях сделан вывод о сходстве долготных статистических характеристик субпровалов и экваториальных ионосферных неоднородностей F -области. Указано, что получено еще одно свидетельство общности природы вышеназванных явлений. Еще раз подтверждено, что области пониженной концентрации He^+ (или субпровалы) правомерно связывать с плазменными “пузырями” экваториального происхождения, наблюдаемыми на высотах верхней ионосферы в концентрации He^+ .

DOI: 10.7868/S0016794012060107

1. ВВЕДЕНИЕ

С начала эры спутниковых наблюдений исследователи неоднократно наблюдали области обедненной концентрации He^+ (H^+) на высотах верхней ионосферы в районе низких и средних широт ($L = 1.3–3.5$ или $20–58^\circ$ INVLAT). Указания на такие области можно обнаружить в ранних работах по данным ИСЗ OGO-4, посвященных исследованиям вариаций плазмопаузы [Taylor et al., 1971]. Там они характеризовались как некие внутренние по отношению к плазмопаузе провалы (inner trough). Далее в работах [Taylor and Cordier, 1974; Brace et al., 1974] эти области получают название — субпровалы (ныне устоявшийся термин) и определяются как области с обедненной плазмой, отчетливо наблюдаемые экваториальнее среднеширотного провала в легких ионах (ПЛИ). Позже о субпровалах сообщают при исследованиях по данным спутников Ogeol-1, -2 [Ершова и др., 1977; Сивцева и Ершова, 1977; Сивцева и др., 1982]. Примечательно, что указанные выше случаи обнаруживаются как в возмущенные периоды во внешней плазмосфере, так и в магнитоспокойные периоды глубоко в плазмосфере ($L \sim 1.3–3.5$).

В целом по публикациям вплоть до 1995 г. сообщалось приблизительно о сотне случаев наблюдения субпровалов. Сообщения о массовых наблюдениях субпровалов в концентрации He^+ стали поступать при анализе данных спутника ISS-b [Sidorova and Ruzhin, 1996], летавшего на высотах

верхней ионосферы (~ 1100 км) в период высокой солнечной активности (1978–1979 гг., $F10.7 \sim 200$). Субпровалы регистрируются в ~ 700 случаях на ~ 1100 пролетах ИСЗ ISS-b [RRL, 1983, 1985]. Тогда же выясняется, что субпровалы не столь уж редкое явление, как это предполагалось ранее, и фиксируются они довольно часто и в довольно широкой полосе от ~ 20 до 58° ($L \sim 1.3–3.5$). Вырабатываются критерии, необходимые для идентификации субпровалов во время быстрых изменений магнитной активности [Карпачев и Сидорова, 1999]. Исследуются суточные, сезонные и долготные вариации вероятности их наблюдения [Карпачев и Сидорова, 2000а, б; Karpachev and Sidorova, 2003; Sidorova, 2004]. Исследуется широтное положение субпровалов в зависимости от уровня магнитной активности и обнаруживается, что наблюдаемые субпровалы можно условно подразделить на две группы. Для одной группы (256 случаев) прослеживается явная зависимость широтного положения от индекса Kp , а для другой (440 случаев) — нет, причем первые преимущественно регистрируются на широтах $45–58^\circ$ ($L \sim 2–3.5$), а вторые — на широтах $20–50^\circ$ ($L \sim 1.3–2.5$). Делается вывод о том, что разные группы субпровалов, по всей видимости, имеют разные механизмы происхождения [Karpachev and Sidorova, 2003; Sidorova, 2004].

Согласно опубликованным данным еще на первых этапах исследования субпровалов выдвигались гипотезы их происхождения и предприни-

мались попытки их физической интерпретации. Например, субпровалы, так или иначе связанные с возмущениями, интерпретировались как “плазменные хвосты”, возникшие в предшествующие возмущенные периоды. Для объяснения их генерации привлекалась модель магнитосферной конвекции [Chen and Wolf, 1972]. Согласно этой модели “плазменные хвосты”, “вмороженные” во внешние слои внутренней плазмосферы, могут формировать структуру, подобную структуре субпровала [Chen et al., 1975]. Относительно субпровалов, обнаруженных глубоко в плазмосфере в спокойных условиях, выдвигалось предположение [Гальперин и др., 1990] о том, что могут существовать некие неизвестные механизмы, связанные либо с локальным ростом потерь, либо с локальным нагревом в магнитных силовых трубках, лежащих глубоко внутри плазмосферы. Однако дальнейшего развития эта идея не получила.

Намного позже уже при анализе данных спутника ISS-b выдвигается идея и приводится ряд доказательств экваториального происхождения субпровалов [Sidorova, 2004, 2007; Сидорова 2008]. Так, при сравнении характеристик субпровалов и типичных экваториально-низкоширотных явлений (экваториальные плазменные “пузыри” (EPB), экваториальное F -рассеяние (ESF)) выявлялась их довольно хорошая корреляция. Делался вывод об общности природы наблюдаемых явлений и выдвигалась гипотеза о том, что наблюдаемые субпровалы (или области обедненной концентрации He^+) есть не что иное, как плазменные пузыри, “видимые” на высотах верхней ионосферы (~ 1100 км) в концентрации He^+ . На вопрос, почему же они становятся “видны” именно в концентрации He^+ предлагался следующий ответ. На высотах верхней ионосферы, где фоновая электронная концентрация оказывается достаточно низкой, “всплывшие” плазменные “пузыри” становятся неразличимы, если пытаться их наблюдать по электронной концентрации (Ne) или концентрации ионов O^+ . Однако по концентрации в ионной компоненте He^+ (минорной специн на высотах образования плазменного “пузыря”), наоборот, они становятся “видны”, поскольку на высотах верхней ионосферы фоновая концентрация ионов гелия сильно возрастает по сравнению с ничтожно малым содержанием He^+ внутри плазменного “пузыря” [Sidorova, 2007; Сидорова, 2008].

Очевидно, что выдвинутая гипотеза требует дальнейшей проверки. По-прежнему остаются неясными ряд моментов, связанных с интерпретацией субпровалов в виде плазменных “пузырей” экваториального происхождения.

Постановка проблемы. Если предполагать, что наблюдаемые обедненные в концентрации He^+ области имеют экваториальное происхождение,

то очевидно, что характер их долготного распределения будет подобен долготным вариациям вероятности наблюдения ряда типичных для экватора явлений. К ним относят EPB, которые регистрируются на высотах F -области, сопутствующие им ESF и ионосферные неоднородности мелкого или среднего масштаба (EFI). Очевидно, что сравнительный анализ долготных вариаций вероятности их наблюдения (или долготной статистики (ДС)) подтвердит или опровергнет выдвинутое предположение. Обсуждение этого вопроса и некоторых других аспектов исследований субпровалов в концентрации He^+ является целью данной работы.

Прежде чем переходить к изложению проведенных исследований необходимо сделать одно существенное замечание. Оно касается уточнения определения изучаемого явления, которое до сих пор звучало как “субпровал” в концентрации He^+ . По всей вероятности, это определение, данное еще на заре исследований, возникло по аналогии и из-за очевидного подобия профиля этой структуры с профилем известных глобальных структур, таких как главный ионосферный провал, или ПЛИ. С точки зрения авторов оно является ограниченным, поскольку несет указание лишь на двумерный (профильный) образ этих структур. Представляется, что более корректно называть их “плазменными областями с обедненной или пониженной концентрацией He^+ ” аналогично тому, как их часто называют в англоязычной литературе емким словом “depletions” (истощение, обеднение). Именно это определение содержит указание на объемность (трехмерность) наблюдаемого явления. В дальнейшем, используя как то, так и другое определения, будем учитывать отмеченные выше особенности.

2. ДОЛГОТНАЯ СТАТИСТИКА (ДС): МАТЕРИАЛЫ

Ранее сообщалось [Sidorova, 2007; Сидорова, 2008] о хорошей корреляции ($R \sim 0.67$) вариаций вероятности наблюдения субпровалов в концентрации He^+ (P_{He^+}) и статистики ESF, построенных в зависимости от сезона и местного времени. Карта P_{He^+} рассчитывалась по данным масс-спектрометрических измерений, проводимых на спутнике ISS-b, а статистика ESF была получена из ионограмм наземного зондирования над отдельными регионами Бразилии [Abdu et al., 2000]. Обоснованно возникал вопрос: почему карта глобального распределения P_{He^+} достаточно хорошо коррелирует с картой региональной статистики ESF? Очевидно, что причина столь хорошего совпадения крылась в особенностях долготного распределения субпровалов и ESF. Возникла задача —

Таблица 1. Материалы сравнительного анализа

Публикация	Спутник	Параметр	LT-интервал	Высоты, км	Широты	Годы	F10.7
Настоящее исследование	ISS-b	P_{He^+}	20-04	~1100	$\pm 20\text{--}50^\circ$ INVLAT	1978–1980	150–220
Maryama and Matuura, 1980	ISS-b	P_{RSF}	18-06	~1100	$\pm 20^\circ$ DIPLAT	1978–1980	150–220
Maryama and Matuura, 1984	ISS-b	P_{ESF}	18-06	~1100	$\pm 20^\circ$ DIPLAT	1978–1980	150–220
McClure et al., 1998	AE-E	$P_{\sigma > 0.5\%}$	19-06	300–475	$\pm 20^\circ$ DIPLAT,	1978–1980	150–220
Watanabe and Oya, 1986	Hinotori	P_{B650}	19-06	~650	$\pm 20^\circ$ DIPLAT	1981	~200
Basu et al., 1976	OGO-6	$P_{\sigma > 0.51\%}$	18-06	400–500	$\pm 20^\circ$ DIPLAT	1969–1970	~150
Su et al., 2006	ROCSAT	$P_{\sigma > 0.3\%}$	18-06	~600	$\pm 15^\circ$ DIPLAT	1999–2004	110–190

Таблица 2. Сезонные интервалы наблюдений

СЕЗОН	Настоящее исследование	Maryama and Matuura, 1980, 1984	McClure et al., 1998	Watanabe and Oya, 1986	Basu et al., 1976	Su et al., 2006
ЗИМА	22 октября–22 февраля	10 ноября–12 марта	ноябрь–январь	ноябрь–январь	ноябрь–декабрь	декабрь
ВЕСНА	22 января–22 мая	9 февраля–13 июня	февраль–апрель	февраль–апрель (?)		март
ЛЕТО	22 апреля–22 августа	апрель–июнь, август	май–июль	май–июль		июнь
ОСЕНЬ	22 июля–22 ноября	11 августа–11 декабря	август–октябрь	август–октябрь (?)		сентябрь

рассчитать ДС наблюдений субпровалов и ESF, а затем провести их детальное сопоставление.

Следует напомнить, что согласно ранее выдвинутой гипотезе [Sidorova, 2007; Сидорова, 2008] плазменные области пониженной концентрации He^+ рассматриваются в качестве плазмосферного следа от средне- или крупномасштабных плазменных “пузырей”, возникающих над экватором в нижней части F -области и поднимающихся на высоты верхней ионосферы и плазмосферы. С другой стороны, известно, что появление ESF свидетельствует о наличии в среде, как минимум, мелкомасштабных неоднородностей, которые “чувствуют” радиосигнал и на которых радиосигнал начинает рассеиваться. Согласно большому числу наблюдений мелко- и среднемасштабные неоднородности сопровождают плазменный “пузырь”, окружая его подобно “гало” [Aggson et al., 1992], и тянутся за ним в кильватере в качестве “шумового шлейфа” [Woodman and La Hoz, 1976]. Плазменный “пузырь” по мере подъема на высоты верхней ионосферы меняет свои геометрические размеры: диффузионные процессы растягивают его вдоль магнитной силовой трубки, и он приобретает бананообразный вид (см., например, [Abdu et al., 2000]). Вершина растянутого плазменного “пузыря”, следуя магнитным силовым линиям, находится строго над экватором, а концы “банана” опускаются по силовым линиям до более низких высот уже низкоширотной области.

В таком виде окруженный облаком более мелкомасштабных неоднородностей он может быть зарегистрирован не только над экватором, но и над низкими широтами и частью среднеширотной области. В этой связи считается, что, если ионосферные неоднородности мелкого и среднего масштаба, регистрируемые по наличию F -рассеяния, появляются не только над экватором, но и в районе низких широт, то они являются индикатором появления и развития плазменных “пузырей” [Abdu et al., 2000]. Таким образом, если ранее выдвинутая гипотеза верна, то следует ожидать, что плазменные “пузыри”, “видимые” как области пониженной концентрации He^+ и ESF (EFI), регистрируемые, как правило, в довольно широком широтном диапазоне $\pm 20^\circ$ DIPLAT, будут иметь сходство по ряду характеристик, в частности, долготных. Последнее, по всей вероятности, позволит прояснить смысл ранее полученной корреляции глобальной и региональной карты.

2.1. Долготная статистика наблюдений плазменных областей пониженной концентрации He^+

Детальный расчет ДС наблюдения плазменных областей пониженной концентрации He^+ проводился на основе уже имеющегося материала [Karpachev and Sidorova, 2003; Sidorova, 2004]. Материал был получен по данным спутника ISS-b [RRL, 1983, 1985], которые за период с августа

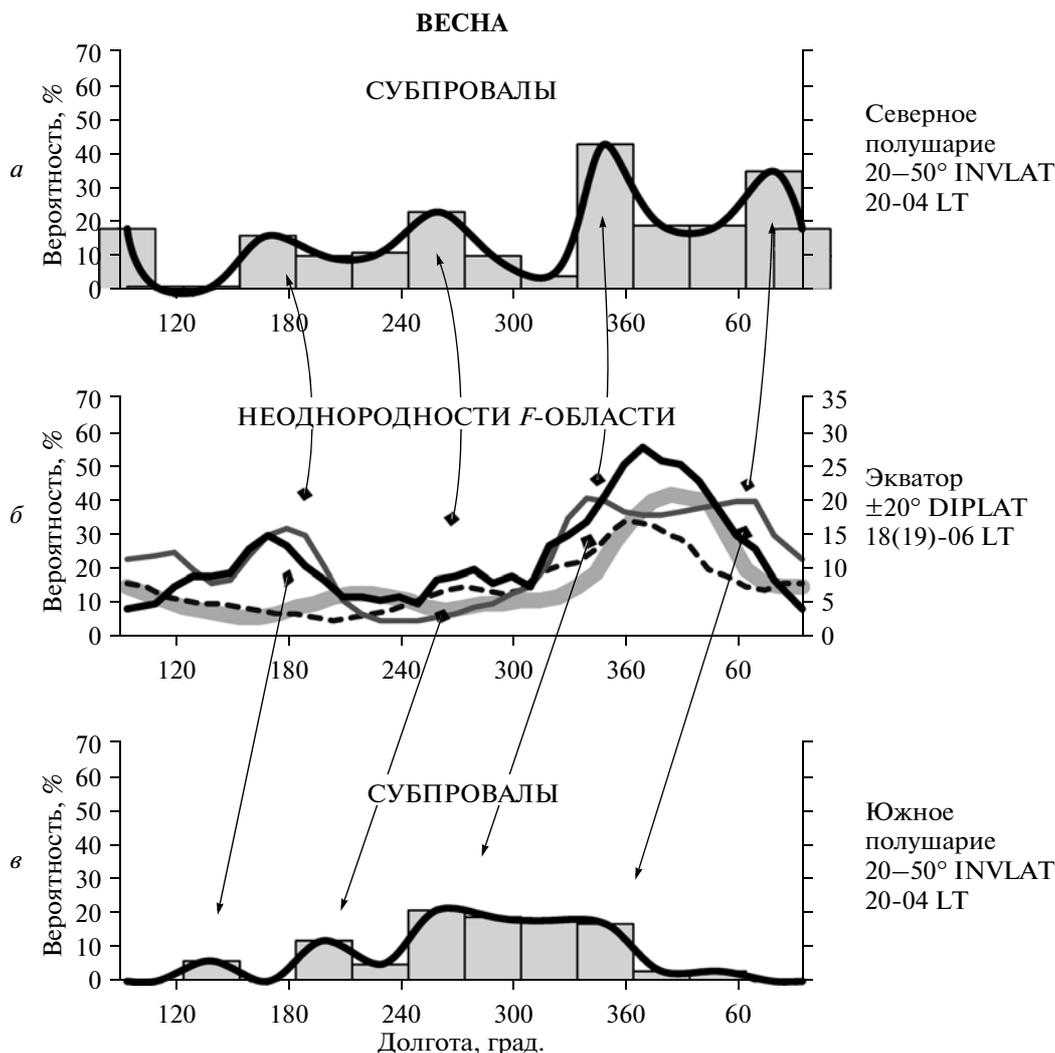


Рис. 1. Долготные вариации вероятности наблюдений ионосферных неоднородностей в период весеннего равноденствия, *a, в* – долготные вариации P_{He^+} к для северного и южного полушарий отдельно; *б* – вариации $P_{\sigma > 0.5\%}$ [McClure et al., 1998] – тонкая черная кривая; вариации $P_{\sigma > 0.3\%}$ [Su et al., 2006] – штриховая линия, шкала величин размещена справа; вариации $P_{\text{RSF(ESF)}}$ [Maryama and Matuura, 1980, 1984] – тонкая серая кривая; вариации P_{B650} [Watanabe and Oya, 1986] – толстая светло-серая кривая.

1978 г. по декабрь 1979 г. (таблицы 1, 2) позволяли выявить субпровалы в статистически значимом количестве. Этот ранее полученный материал был отредактирован и дополнен: данные были собраны в широтном диапазоне $\pm 20\text{--}50^\circ$ INVLAT отдельно для северного и южного полушарий в геомагнитных долготных интервалах шириной 15° . Помимо имеющихся долготных характеристик P_{He^+} зимнего и летнего периода впервые были рассчитаны долготные характеристики P_{He^+} равноденственных периодов (рисунки 1, 2).

Каждый сезон был представлен четырехмесячным интервалом, центрированным относительно

дня солнцестояния/равноденствия соответственно. Например, весенний сезон рассматривался за два месяца до и после дня весеннего равноденствия, т.е. с 22 января по 22 мая (табл. 2). При таком делении на сезоны происходило частичное перекрытие наблюдений. Однако данный подход был обусловлен тем, что рассматривался не столь протяженный ряд измерений (1978–1979 гг.), в отдельные месяцы имеющий довольно значительные пробелы. Например, частично или полностью отсутствовали измерения за летние месяцы.

Необходимо также упомянуть, что в расчет принимались только те случаи наблюдений плазменных областей пониженной концентрации

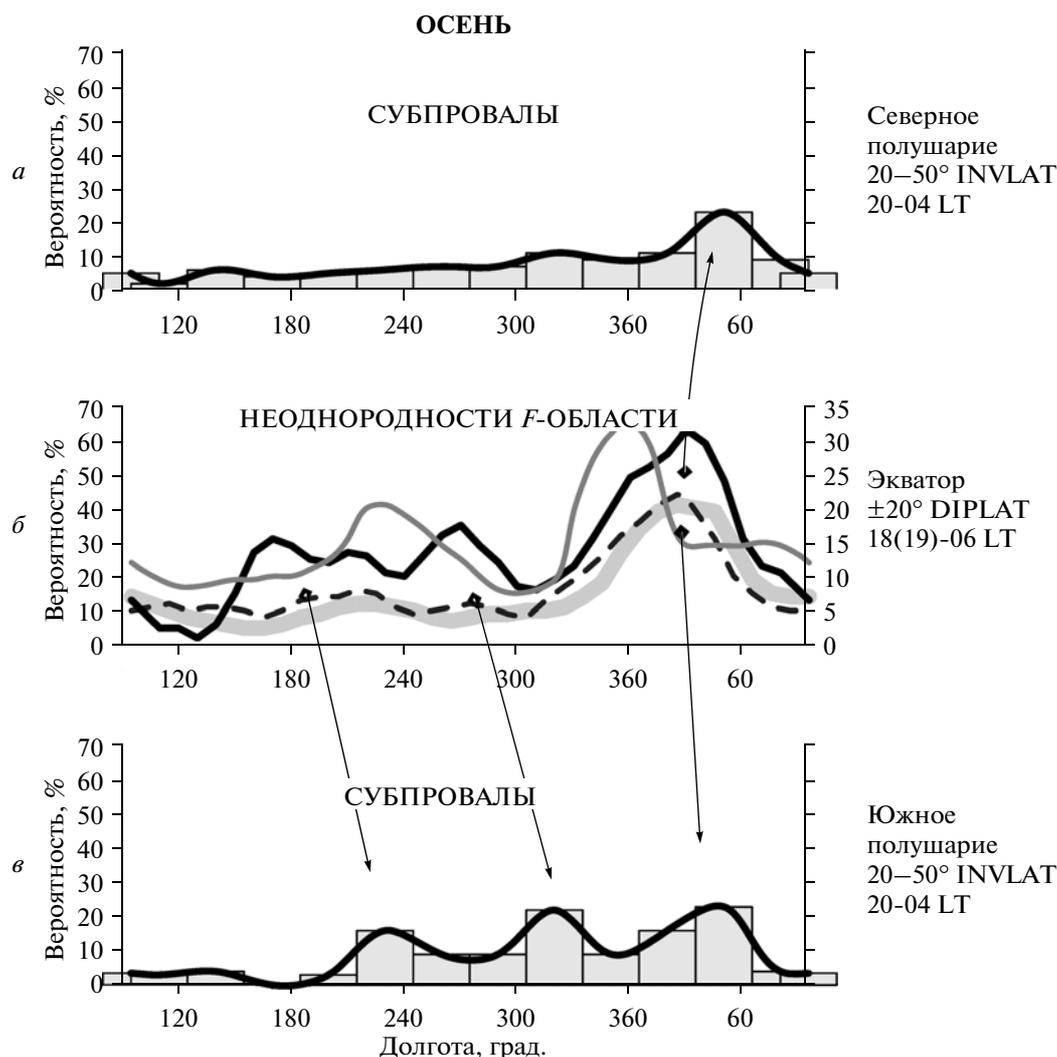


Рис. 2. Долготные вариации вероятности наблюдений ионосферных неоднородностей в период осеннего равноденствия. Кривые *а, б, в* соответствуют описанию, приведенному к рис. 1.

Ne^+ , в которых величина концентрации уменьшалась в два и более раза по отношению к фоновой.

2.2. Долготная статистика наблюдений экваториальных ионосферных неоднородностей F-области (EFI)

В качестве материала для сравнения были использованы данные о ДС наблюдений EFI. Эти данные были обнаружены по ряду публикаций по измерениям разных спутников. Наиболее ценной для выполнения поставленной задачи оказалась работа McClure и коллег [McClure et al., 1998], в которой помимо собственных результатов в удобной форме приводились результаты других исследователей. Авторы настоящей работы считают большой удачей, что был найден столь ценный исследовательский материал. Обнаруженная ДС наблюдений EFI с конкретизацией амплитудного

диапазона и масштаба неоднородности позволила провести более детальный сравнительный анализ, чем планировалось ранее с использованием F-рассеяния. Все расчетные данные, используемые для сравнительного анализа, представлены в таблицах 1 и 2. Следует отметить, что все они были получены либо за интервал 1978–1980 гг. ($F10.7 = 150\text{--}220$), либо за годы с близким уровнем солнечной активности. Дадим краткую характеристику этих данных.

а) Результаты McClure et al. [1998]. В работе [McClure et al., 1998] по данным спутника AE-E была получена ДС наблюдений EFI. Расчет проводился в широтном интервале $\pm 20^\circ$ DIPLAT на высотах F-области (300–475 км). Использовались данные наблюдений за период с начала 1978 г. по сентябрь 1980 г. (табл. 1). Рассматривались неоднородности по флуктуации ионной плотности, и в расчет брались только те, у которых величина

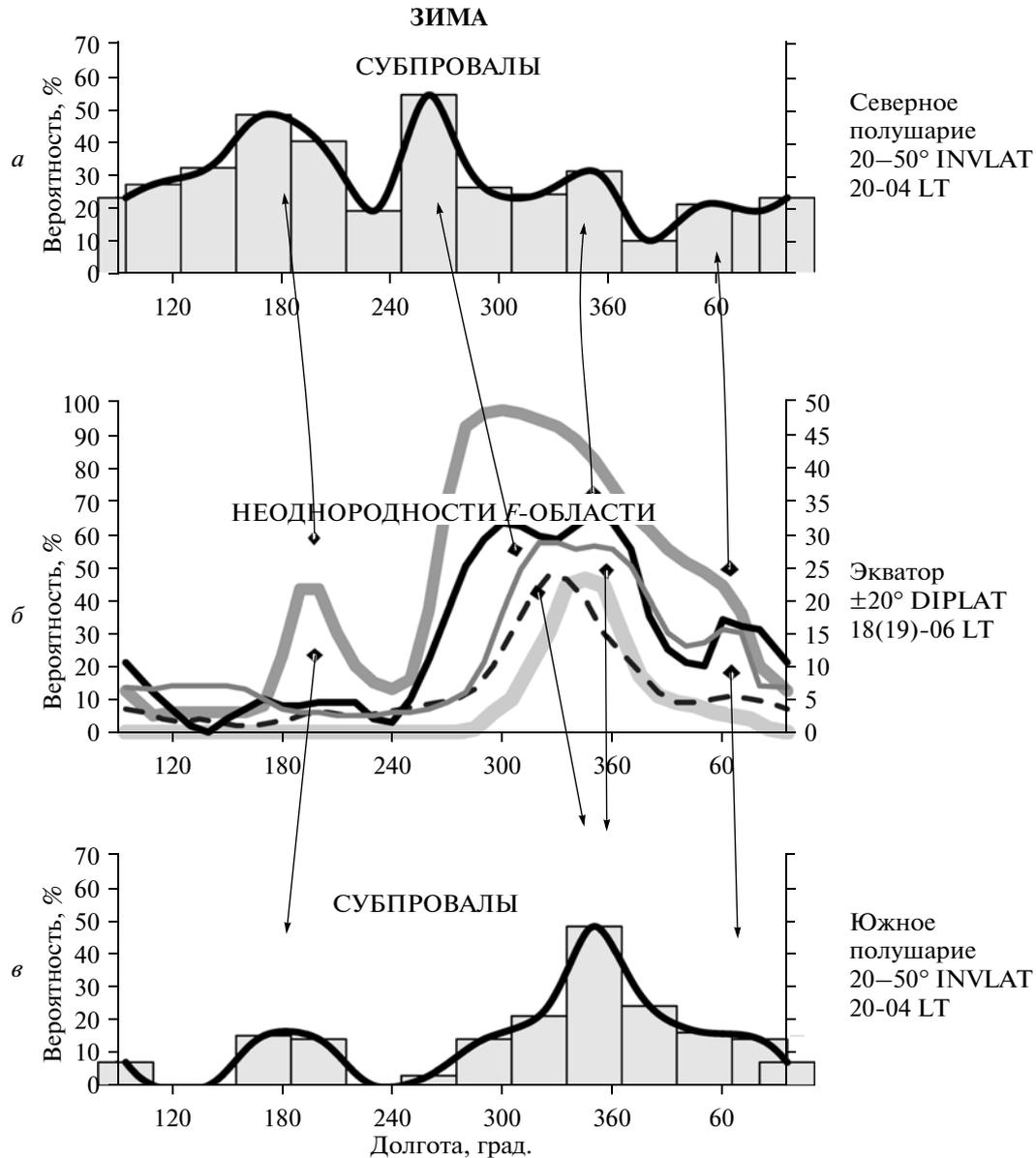


Рис. 3. Долготные вариации вероятности наблюдений ионосферных неоднородностей в период зимнего солнцестояния. Кривые *а, б, в* соответствует описанию, приведенному к рис. 1. Долготные вариации $P_{\sigma > 0.51\%}$ [Basu et al., 1976] – темно-серая кривая (*б*).

нормированного индекса (σ) была более 0.5%. Напомним, что $\sigma = \Delta Ni / \bar{Ni}$, где \bar{Ni} – среднее значение фоновой ионной плотности, а ΔNi – стандартное отклонение фоновой ионной плотности. Приборные характеристики и используемая методика отбора позволяли выявлять неоднородности, размер которых варьировался от 50 до 1000 км. Построенная ДС наблюдений EFI была представлена для всех сезонов и получена путем усреднения по 3-месячным интервалам (табл. 2), целиком совпадающим с интервалами, используемыми в настоящей работе. На рисунках 1–4 долготные

вариации вероятности наблюдения EFI ($P_{\sigma > 0.5\%}$) показаны тонкой черной кривой.

б) Результаты Su et al. [2006]. Представленная в работе [Su et al., 2006] ДС наблюдений EFI была рассчитана по данным спутника ROCSAT, летавшего на высотах верхней ионосферы (~600 км). Расчеты производились в широтном интервале $\pm 15^\circ$ DIPLAT за один месяц каждого сезона (декабрь, март, июнь, сентябрь). Важно отметить, что для расчетов использовались измерительные данные, полученные за продолжительный срок наблюдений (1999–2004 гг.). Большая часть наблюдений приходилась на период с максимальным

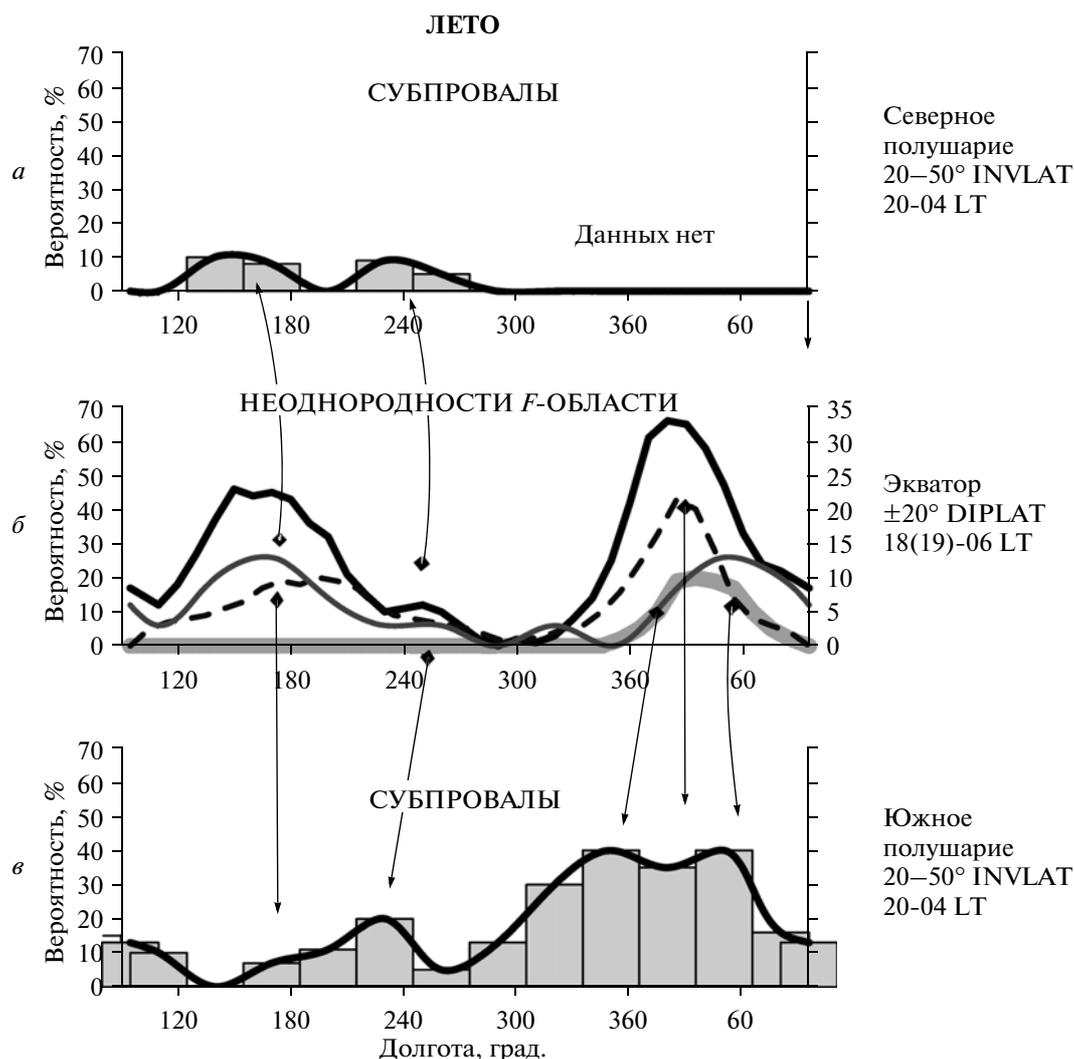


Рис. 4. Долготные вариации вероятности наблюдений ионосферных неоднородностей в период летнего солнцестояния. Кривые *a*, *б*, *в* соответствуют описанию, приведенному к рис. 1.

уровнем солнечной активности (1999–2002 гг., $F_{10.7} = 140–190$, 23-ий цикл), меньшая часть – на период с умеренной активностью (2003–2004 гг., $F_{10.7} = 110–130$). Поскольку в наблюдениях доминировал высокий уровень солнечной активности, то представлялось возможным использовать эти данные для сравнительного анализа. В работе рассматривались неоднородности с флуктуациями ионной плотности (N_i) со значением $\sigma > 0.3\%$. Имелась настройка на высокое пространственное разрешение, что позволяло регистрировать неоднородности размером от 7.5 до 75 км. Однако следует указать, что используемый критерий отбора повлек снижение рассчитываемого уровня вероятности по отношению к расчетам других исследователей (например, [McClure et al., 1998]) в ~ 2 раза. На рисунках 1–4 долготные вариации вероятности наблюдения EFI ($P_{\sigma > 0.3\%}$), выявленные по

данным ИСЗ ROCSAT, показаны штриховой линией, шкала графиков находится справа.

в) Результаты Basu et al. [1976]. Наконец, для поставленных целей очень полезными оказались результаты работы [Basu et al., 1976]. В работе использовались данные спутника OGO-6 и был проведен расчет ДС наблюдений EFI зимнего периода. Использовались измерения N_i на высотах 400–500 км и рассматривались только те, у которых величина нормированного индекса неоднородности (σ) превышала 0.51% ($P_{\sigma > 0.51\%}$). Медианные значения $P_{\sigma > 0.51\%}$ были рассчитаны по четырем зимним месяцам (ноябрь–декабрь, 1969–70 гг.) в широтном интервале $\pm 20^\circ$ DIPLAT. Полученные вариации $P_{\sigma > 0.51\%}$ показаны на рис. 3 толстой темно-серой кривой.

2.3. Долготная статистика наблюдений экваториального F -рассеяния (ESF)

Самые мелкие экваториальные неоднородности (1–10 км), или так называемый “шум”, диагностируются по появлению ESF. Для сравнительного анализа была использована ДС наблюдений ESF, обнаруженная в работе [Maryama and Matuuga, 1980] по данным спутника, ISS-b. Измерения проводились по параметру “ F -рассеяние радиосигнала по высоте” (Range Spread F, RSF) для широтного интервала $\pm 20^\circ$ DIPLAT за период с августа 1978 г. по сентябрь 1980 г. Расчеты долготной вероятности RSF (P_{RSF}) были получены для трех сезонов (табл. 2). (Данные для летнего сезона отсутствовали.) Использовались 4-месячные сезонные интервалы, к сожалению, не центрированные по отношению к моменту солнцестояния/равноденствия, что давало пересечение с интервалами, используемыми в настоящей работе, на ~80%. Недостающая ДС наблюдений ESF летнего периода была получена по результатам другой работы этих же авторов [Maryama and Matuuga, 1984]. В работе приводились контурные карты ESF, построенные в относительных единицах и рассчитанные с помощью сферического анализа. По картам за апрель–май (18–24 LT), май–июнь и август (00–06 LT) были рассчитаны долготные вариации вероятности наблюдения RSF(ESF) ($P_{RSF(ESF)}$) летнего периода. На рисунках 1–4 вариации $P_{RSF(ESF)}$ показаны тонкой серой кривой.

2.4. Долготная статистика наблюдений экваториальных плазменных “пузырей” F -области (EPB)

Поскольку настоящая работа посвящена проблеме эволюции плазменных “пузырей” на высотах верхней ионосферы и плазмосферы, то очевидно, что для сравнительного анализа было крайне желательно иметь сведения о долготном поведении EPB на высотах F -области. Такая информация была обнаружена в работе [Watanabe and Oya, 1986]. В ней использовались данные спутника Hinotori за 1981 г., характерный высоким уровнем солнечной активности ($F10.7 \sim 200$). В работе приводилась ДС наблюдения плазменных “пузырей”, регистрируемых по измерениям ионной плотности на высотах верхней ионосферы ~650 км, (P_{B650}). Использовались измерения EPB, проводимые в широтном диапазоне $\pm 20^\circ$ DIPLAT в течение трех сезонов (табл. 1). (Для периодов равноденствия была представлена одна и та же расчетная кривая.) Каждый сезон рассчитывался путем усреднения по трем месяцам, целиком совпадающим с месяцами сезонного деления настоящей работы. На рисунках 1–4 долготные

вариации P_{B650} показаны толстой светло-серой кривой.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Прежде необходимо еще раз подчеркнуть, что все вышеупомянутые результаты были получены по измерениям, проведенным в приблизительно одинаковых гелиогеофизических условиях (местное время, сезон, уровень солнечной активности), и поэтому пригодны для сравнения. Например, наблюдения EFI, ESF и EPB проводились примерно в один и тот же интервал местного времени 18(19)–06 LT. Нетрудно заметить, что интервал наблюдений субпровалов в концентрации He^+ был выбран более узким (20–04 LT). Это было сделано намеренно по простым геометрическим соображениям, поскольку очевидно, что на больших высотах (высотах верхней ионосферы ~1100 км) именно такой интервал будет более адекватен заходному и темному времени суток.

Проведем анализ имеющихся данных за разные сезоны. Сначала рассмотрим периоды равноденствий, когда для обоих полушарий были характерны приблизительно одни и те же гелиофизические условия, а затем периоды солнцестояний, когда в разных полушариях наблюдалась наибольшая разница в освещенности.

3.1. Весеннее равноденствие. Как и следовало ожидать, изучаемые вариации вероятности наблюдений субпровалов (P_{He^+}) оказались наиболее подобны вариациям P_{RSF} [Maryama and Matuuga, 1980], рассчитанным по данным спутника ISS-b (рис. 1). Действительно, если гипотеза об экваториальном происхождении плазменных областей пониженной концентрации He^+ верна, то результаты, полученные по наблюдениям одного и того же спутника, должны быть максимально подобными. Другими словами, экваториальной картине ($\pm 20^\circ$ DIPLAT) вариаций P_{RSF} следует максимально подобно проецироваться на вариации P_{He^+} широтных интервалов ± 20 – 50° INVLAT разных полушарий с поправкой на особенности хода магнитного поля в разных полушариях. Последнее отчетливо наблюдается на рис. 1. Видно, что экваториальной ДС подобны вариации P_{He^+} как северного, так и южного полушарий. Максимумы вариаций P_{He^+} проецируются примерно на те же долготы, что и максимумы P_{RSF} . Кроме того, обнаруживается сходство форм вариаций P_{He^+} как в северном, так и в южном полушариях.

При сравнении ДС наблюдений субпровалов (P_{He^+}) с графиками $P_{\sigma > 0.5\%}$ [McClure et al., 1998] и $P_{\sigma > 0.3\%}$ [Su et al., 2006] также выявляется довольно

хорошее сходство форм долготных вариаций. Это сходство становится наиболее убедительным, если рассматривать второстепенные и “тонкие” детали профилей. Так, на вариациях вероятности наблюдений EFI хорошо видны локальные максимумы (долготы ~ 180 и $\sim 270^\circ$), (которые затем также отчетливо проявляются в вариациях вероятности наблюдения субпровалов обоих полушарий). Другая деталь экваториальных графиков — раздвоение главного максимума вероятности EFI. Оно только намечается на графике $P_{\sigma > 0.3\%}$ [Su et al., 2006], отчетливо видно $P_{\sigma > 0.5\%}$ [McClure et al., 1998], а на вариациях P_{RSF} [Miyama and Matsumura, 1980] — это уже хорошо сформировавшаяся двугорбая структура, которая затем отчетливо проявляется в долготных вариациях P_{He^+} обоих полушарий.

Что касается вероятности наблюдения плазменных “пузырей” (P_{B650}), то сходство здесь не такое убедительное, хотя главная тенденция все же прослеживается. Заметим, что авторы работы [Watanabe and Oya, 1986] для весны и осени предлагали одну и ту же расчетную кривую. Возможно поэтому соответствие с остальными графиками не столь четкое.

3.2. Осеннее равноденствие. Для осеннего периода ожидаемого хорошего сходства вариаций P_{He^+} вариациями P_{RSF} (тонкая серая кривая), к сожалению, не обнаруживается (рис. 2). Нетрудно заметить, что вариации P_{RSF} общих чертах скорее напоминают ДС зимнего сезона (рис. 3), чем осеннего. И действительно, интервал наблюдений, взятый авторами работы [Miyama and Matsumura, 1980], (11 августа—11 декабря, табл. 2) не центрирован относительно равноденствия, сильно перекрывается с зимним сезоном, откуда и возникает “зимний образ”. Хотя следует признать, что подобный подход при выборе весеннего интервала (9 февраля—13 июня, табл. 2), частично перекрывающегося с летом, не “портит” P_{RSF} весеннего периода столь кардинально. Это легко объясняется тем, что летняя ДС наблюдения ESF не столь ярко выражена (рис. 4), и перекрытие с ней не вносит кардинальных изменений, чего нельзя сказать о зиме, когда наблюдения ESF были очень интенсивными.

Проведем сравнительный анализ с ДС наблюдений плазменных “пузырей” (P_{B650}) [Watanabe and Oya, 1986] этого периода. Если гипотеза экваториального происхождения плазменных областей пониженной концентрации He^+ верна, то долготные характеристики P_{He^+} должны показывать максимальное подобие долготным вариациям P_{B650} (наряду с P_{RSF} , полученным по данным ИСЗ ISS-b). Другими словами, вероятность появления плазменных пузырей на высотах ~ 1100 км и

выше, обнаруживающих себя в виде субпровалов в концентрации He^+ на широтах $\pm 20-50^\circ$ INV/LAT, целиком и полностью зависит от той статистической картинки, которая имела место на меньших высотах (например, ~ 650 км) в экваториальных и низких широтах ($\pm 20^\circ$ DIPLAT). Также очевидно, что ДС наблюдений плазменных “пузырей”, сумевших подняться до высот верхней ионосферы и плазмосферы, под влиянием диссипативных процессов уже будет более размытой. Более того, поскольку плазменные “пузыри” регистрируются на разнесенных по разным полушариям широтах ($\pm 20-50^\circ$ INV/LAT), то, очевидно, что на их “выживание” будут влиять еще и особенности рассматриваемого полушария (сезон, склонение магнитного поля, меридиональные ветры и т.д.). Возможно, что в одном полушарии будут возникать более благоприятные условия, при которых ДС наблюдений плазменных “пузырей” будет испытывать минимальную деформацию, а в другом полушарии, наоборот, могут возникнуть такие условия, которые будут либо сильно деформировать ДС, либо вообще не дадут шанса плазменному “пузырю” там “выжить”. Ситуация несколько упрощается, если рассматривать периоды равноденствий, для которых характерно приближительное равенство сезонных условий обоих полушарий.

С учетом всех возможных факторов воздействия следует ожидать, что в период равноденствия вариации P_{B650} будут проецироваться на широты $\pm 20-50^\circ$ INV/LAT северного и южного полушарий довольно хорошо или, по крайней мере, с минимальными искажениями. И действительно, в южном полушарии это хорошо прослеживается в появлении отчетливого главного максимума аналогичной формы практически на тех же долготах, что и на экваторе. Правда, в северном полушарии главный максимум проецируется с некоторым долготным сдвигом и выглядит несколько “задавленным”, а по величине сравним с двумя другими локальными максимумами P_{He^+} (рис. 2).

Если проводить сравнение вариаций P_{B650} , $P_{\sigma > 0.3\%}$, $P_{\sigma > 0.5\%}$ между собой, то можно заметить, что они также очень хорошо друг другу соответствуют. Сходство наблюдается даже в деталях. Особенно удивительно совпадают долготные вероятности, полученные по данным спутников ROCSAT [Su et al., 2006] и Hinotori [Watanabe and Oya, 1986]. Следует напомнить, что измерения на этих спутниках проводились практически в одном и том же высотном диапазоне (600–650 км), хотя одни касались мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, а другие — плазменных “пузырей” [Watanabe and Oya, 1986].

Нетрудно заметить, что вариации P_{He^+} обоих полушарий имеют очень хорошее сходство с ва-

риациями $P_{\sigma > 0.5\%}$ (EFI), рассчитанными в работе [McClure et al., 1998]. Напомним, что измерения EFI проводились на высотах 300–475 км (табл. 1), т.е. на высотах формирования плазменных “пузырей”, и, что самое ценное, они проводились одновременно, с исследуемыми измерениями – в те же годы и сезонные интервалы (табл. 1, 2). По сути вариации $P_{\sigma > 0.5\%}$ представляет собой исходную статистическую картинку EFI на момент зарождения плазменных “пузырей”. На ней, помимо главного максимума, отчетливо видны еще два локальных максимума (~ 180 и $\sim 270^\circ$), которые в дальнейшем с небольшим долготным сдвигом прекрасно воспроизводятся в ДС наблюдений субпровалов северного полушария, а также отчетливо видны и в южном полушарии (рис. 2).

Теперь перейдем к сравнительному анализу ДС зимнего и летнего периодов, (периодов солнцестояний), для которых наблюдается наиболее существенная разница в освещенности/затемнении разных полушарий. Очевидно, что в эти сезоны следует ожидать наиболее значительную разницу и в вероятности наблюдения субпровалов разных полушарий. В этой связи обоснованно возникает вопрос. А как это будет соотноситься с вероятностью наблюдения EFI, (ESF) и плазменных “пузырей”, регистрируемых на экваторе?

3.3. Зимнее солнцестояние. Прежде обратим внимание на ДС наблюдений субпровалов (P_{He^+}) северного полушария (рис. 3). Нетрудно заметить, что этот график имеет поразительное сходство с большинством экваториальных характеристик (рис. 3). Так, слегка намечающееся раздвоение главного максимума P_{RSF} по данным [Maryama and Matuura, 1980], проявляющееся в уширении пика максимума P_{B650} по данным [Basu et al., 1976] и наиболее отчетливо видное в появлении двух горбов $P_{\sigma > 0.5\%}$ по данным [McClure et al., 1998], на графике субпровалов превращается в хорошо оформленный двугорбый максимум с довольно глубокой внутренней ложбиной. Причем этот раздвоенный максимум P_{He^+} , приходящийся на долготы ($270-30^\circ$), приблизительно совпадает по долготам с уширенным максимумом $P_{\sigma > 0.51\%}$ [Basu et al., 1976]. Показывая практически идеальное сходство формы с вариациями $P_{\sigma > 0.5\%}$ и P_{RSF} он, однако, испытывает небольшой долготный сдвиг и расплывание по отношению к ним. Необходимо отметить, что и “тонкие” детали долготных вариаций вероятности наблюдения EFI как бы “проявляются” и находят свое отражение в вариациях P_{He^+} . Например, небольшой рост значений большинства экваториальных характеристик на долготе $\sim 60^\circ$ повторяется в локальном максимуме P_{He^+} на той же долготе ($\sim 60^\circ$).

Отдельного комментария требует локальный максимум в ДС наблюдений субпровалов (P_{He^+}), приходящийся на долготы $\sim 150-180^\circ$. Его достоверность можно было бы поставить под сомнение, если бы не наличие второго отчетливого максимума $P_{\sigma > 0.51\%}$, обнаруженного по данным ИСЗ OGO-6 [Basu et al., 1976], а также небольшого, но отчетливого роста величины $P_{\sigma > 0.5\%}$ по данным ИСЗ AE-E [McClure et al., 1998]. (Следует признаться, что этот максимум вероятности наблюдения субпровалов, появляющийся как в южном, так и в северном полушарии, порождает наибольшее “несходство” с графиками экваториальных неоднородностей. Этот “неудобный” максимум смущал до тех пор, пока аналогичный отчетливый максимум не был нами обнаружен в работе [Basu et al., 1976].)

Другая часть экваториальных характеристик ($P_{\sigma > 0.3\%}$ [Su et al., 2006], P_{B650} [Watanabe and Oya, 1986]) имеет удивительное сходство с вариациями P_{He^+} южного полушария (рис. 3). Максимум вероятности наблюдения экваториальных плазменных “пузырей” (P_{B650}) и экваториальных неоднородностей ($P_{\sigma > 0.3\%}$) в точности повторяется в максимуме P_{He^+} , слегка сдвинутым по долготе. Локальный максимум $P_{\sigma > 0.51\%}$, обнаруженный по данным [Basu et al., 1976] на $\sim 180^\circ$, по-прежнему более чем отчетливо виден в вариациях P_{He^+} южного полушария.

3.4. Летнее солнцестояние. При анализе результатов летнего периода (рис. 4) нетрудно заметить, что главный максимум вероятности, выявляемый у всех EFI, на долготе $\sim 30^\circ$, также отчетливо проецируется и на графике вероятности наблюдения субпровалов южного полушария. Правда, проявляется он там уже раздвоенным. И это неудивительно, поскольку тенденцию к уширению с последующим раздвоением можно обнаружить еще в ДС наблюдений экваториальных плазменных пузырей P_{B650} [Watanabe and Oya, 1986]. Что касается второго структурированного максимума ДС наблюдения EFI ($\sim 150-180^\circ$, $\sim 240^\circ$), то он, сильно деформированный с “боковым лепестком”, также находит свое отражение в ДС наблюдений субпровалов южного полушария.

Следует отметить, что по северному полушарию в измерениях ИСЗ ISS-b имелся ряд пробелов, и поэтому рассчитанная ДС наблюдений субпровалов неполна. Однако даже по обрывочным оценкам можно определить, что структурированный максимум вероятности наблюдений EFI ($\sim 150-180^\circ$, $\sim 250^\circ$), проявляется также и на графике вероятности наблюдений субпровалов в виде двух локальных максимумов приблизительно одной и той же величины.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Обсудим полученные результаты в деталях: в зависимости от сезона, с особенностями проявления по разным полушариям.

Сначала обсудим результаты, полученные в периоды равноденствий. Известно, что в эти периоды линия терминатора почти перпендикулярна линии экватора, что создает равенство условий освещенности/затемнения обоих полушарий. Последнее хорошо заметно по графикам – вероятность наблюдения субпровалов в разных полушариях практически одинакова по интенсивности имеет сходную тенденцию в очертании форм вариаций. Можно предположить, что имеющаяся разница долготных вариаций возникает, в первую очередь, из-за особенностей хода магнитного поля в разных полушариях, а именно: из-за разницы угла склонения магнитного поля. Имеются указания (см., например, [Tsunoda, 1985]), что “эффект магнитного склонения” (“magnetic declination effect”) в иерархии причин, влияющих на развитие экваториальных неоднородностей, является одной из главных причин особенностей их долготного проявления.

Что касается периодов солнцестояния, то в графиках вероятности наблюдения субпровалов разных полушарий наблюдается наиболее значительная разница. (Вывод сделан на основе анализа данных зимнего сезона). Графики долготных вариаций $P_{не+}$ разных полушарий друг по отношению к другу сильно деформированы и сдвинуты по долготе. Однако даже для этих столь разных статистических картин обнаруживается общность с ДС наблюдений EFI (ESF) и экваториальных плазменных “пузырей” (EPB). В этом случае особенно ценно, что сравнение идет не с одним набором данных EFI (ESF, EPB), а с целой серией, полученной разными авторами и по данным разных спутников. Представляется, что наличие целого набора таких характеристик позволяет воссоздать наиболее адекватную картину долготного развития плазменных неоднородностей экваториальной области. И именно такая картина позволяет обнаружить динамику и тенденции долготного распределения экваториальных неоднородностей, которые, как было показано выше, уже несут в себе отдельные черты вероятности долготного распределения субпровалов южного и северного полушарий. Сильная изменчивость ДС наблюдений субпровалов разных полушарий этого периода, по всей видимости, зависит от сочетания, как минимум, двух факторов: сезонности и особенностей хода магнитного поля (“эффект магнитного склонения”). В первом приближении, т.е. с учетом только одного сезонного фактора, в одном полушарии этого периода могут возникать более благоприятные условия для “выживания” плазменных пузырей, а в другом, наоборот, – ме-

нее благоприятные. Следует отметить, что под сезонным фактором подразумевается не только разница в освещенности/затемнении разных полушарий, но и, например, связанная с этим изменчивость меридиональных (трансэкваториальных) ветров. А меридиональные ветры, как известно, играют не последнюю роль в эволюции плазменных “пузырей” (см., например, [Abdu, 2001]). Сравнение модельных расчетов характера меридиональных ветров разных сезонов и суточной вероятности наблюдения субпровалов [Сидорова, 2008] свидетельствует о том, что ветры обладают способностью как “запирать” развитие плазменных “пузырей” (субпровалов) так и, наоборот, им благоприятствовать. Сочетание сезонности с “эффектом магнитного склонения” также вносит свои довольно значительные поправки в процессы, идущие над экватором и низкими широтами. В частности, имеются указания на то, что особенности склонения магнитного поля контролируют сезонную вероятность наблюдения EFI и ESF [Tsunoda, 1985; Abdu et al., 1992]. Другими словами, при всех прочих равных сезонных условиях существуют выделенные долготы, где вероятность наблюдения EFI и ESF существенно возрастает (возрастает там, где имеется малый угол между линиями терминатора и магнитного меридиана) [Abdu et al., 1992]. Что касается уже сформировавшихся EFI и ESF, достигших значительных высот, то, по всей видимости, для них вероятность быть обнаруженными в разных полушариях также сильно зависит от комплексного влияния этих факторов. Очевидно, что сочетание факторов может создавать такие условия, при которых режим благоприятствования/подавления будет “работать” в одном полушарии на одних долготах, а в другом полушарии – на других долготах. В итоге, в одном полушарии ДС наблюдений плазменных “пузырей” может испытывать минимальную деформацию (изменяться по величине и сдвигаться по долготе) по отношению к исходной экваториальной картине, а в другом полушарии под влиянием “плохих” условий будет деформироваться сильнее, либо “подавляться” вообще.

Наконец, необходимо сделать одно существенное замечание, касающееся всех приводимых в работе графиков. Нетрудно заметить, что большинство графиков ДС наблюдений субпровалов (плазменных “пузырей”) разных сезонов имеют четыре локальных максимума вероятности. Такие вариации долготной вероятности напоминают “волновые структуры” с волновым числом 4. Максимумы наиболее хорошо видны зимой, а весной в северном полушарии, летом и весной – в южном полушарии. (Данные этих сезонов наиболее полно представлены). Причем, как уже упоминалось, тенденцию к их появлению можно проследить еще на графиках вероятности на-

блюдения экваториальных неоднородностей EFI (ESF, EPB), т.е. вблизи экватора ($\pm 20^\circ$, DIPLAT). Однако наиболее отчетливо “волновая структура” с четырьмя локальными максимумами “оформляется” только на графиках статистики субпровалов, т.е. на широтах, уже довольно сильно разнесенных от экватора ($\pm 20-50^\circ$ INVLAT).

В последние годы появилось множество сообщений на тему о подобных “волновых долготных структурах” с волновым числом 4. Они обнаруживаются по измерениям плазменной или электронной концентрации в районе экваториальных и низких широт F -области (см., например, [Lühr et al., 2007; Jin et al., 2008; Fang et al., 2009]). Примечательно, что наиболее ранние сообщения о таких структурах появились в отечественной литературе. Так, Деминовой Г.Ф. еще в 1995 г. [Деминова, 1995] при исследовании вариаций $foF2$ была выявлена “волнообразная структура долготных изменений ночной экваториальной аномалии”. На представленных ею графиках хорошо видна “волновая структура” с 4-мя максимумами, полученная по измерениям, произведенным как во впадине, так и на гребнях аномалии. На сегодняшний день считается (см., например, [Jin, 2008]), что такие долготные вариации плазмы возникают под влиянием модулированного вертикального $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа F -области. Эффект модуляции вертикального $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа, в свою очередь, наводится (по цепи электродинамических процессов) источником, берущим начало в тропосфере. Считается, что этим источником являются солнечные (суточные) приливные волны (DE3), создающие зональные возмущенные электрические поля. Эти поля, добавляясь к фоновому динамо-полю, оказывают модулирующее воздействие на ионосферный фонтан-эффект [Jin, 2008].

Согласно ряду сообщений (см., например, [Kil et al., 2008]) “волновые долготные” вариации плазменной плотности могут наблюдаться на высотах F -области и верхней ионосферы как днем, так ночью. Если находиться в рамках нашей гипотезы об экваториальном происхождении субпровалов, то можно предположить, что “волнообразная структура” “наводится” на ДС наблюдений субпровалов. Как это возможно? По всей видимости, “волновая” долготная структурированность плазмы через модулированный $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейф может “передаваться” (транслироваться) на всю F -область низкоширотной ионосферы и добираться до высот верхней ионосферы, все более “расплываясь” по широте благодаря специфике фонтан-эффекта верхней ионосферы. Последнее может привести к проявлению (отражению) долготной плазменной структурированности на особенностях ДС наблюдений плазменных “пузырей”. Если это так, то, возможно, получено еще одно подтверждение общности физических меха-

низмов, подтверждение генетической связи экваториальных явлений с предметом исследования.

5. ВЫВОДЫ

Проведен сравнительный анализ долготной вероятности наблюдения областей пониженной концентрации He^+ (субпровалов), рассчитанной для разных полушарий. Полученные ДС были детально сравнены со ДС наблюдений экваториальных неоднородностей F -области. Для этого использовались результаты наблюдения EFI экваториального F -рассеяния (RFS, EFS) и экваториальных плазменных “пузырей” (EPB). Перекрестный анализ позволил прийти к следующим заключениям.

1. Для периодов равноденствия, когда существует приблизительное равенство условий освещенности/затемнения обоих полушарий, выявлено следующее:

а. ДС наблюдений субпровалов, полученная в разных полушариях, практически одинаково развита по интенсивности и имеет сходную тенденцию в очертании форм вариаций. Выдвинуто предположение, что небольшая разница в форме вариаций и долготный сдвиг вызваны, в первую очередь, особенностями хода магнитного поля в разных полушариях, т.е. “эффектом магнитного склонения”.

б. Обнаружено, что графики ДС наблюдений экваториальных неоднородностей F -области (EFI, RFS, EFS, EPB) имеют хорошее сходство с ДС наблюдений субпровалов как северного, так и южного полушарий.

2. Для периодов солнцестояния, когда в разных полушариях имеется наиболее значительная разница в освещенности/затемнении полушарий, выявлено следующее:

а. Графики ДС наблюдений субпровалов, полученные в разных полушариях, сильно различаются между собой. Выдвинуто предположение, что эта разница является результатом комплексного воздействия сезонного фактора (разницы в освещенности полушарий, изменчивости меридиональных ветров) и “эффекта магнитного склонения”.

б. Выявлено, что даже эти столь разные статистические картины долготной регистрации субпровалов имеют общность с ДС наблюдений EFI (ESF) и EPB. Например, долготные вариации P_{RSF} [Maryama and Matuura, 1980], $P_{\sigma > 0.51\%}$ [Basu et al., 1976] и $P_{\sigma > 0.5\%}$ [McClure et al., 1998] имеют максимальное сходство с графиками вероятности наблюдений субпровалов северного полушария зимнего периода. А другая часть экваториальных характеристик ($P_{\sigma > 0.3\%}$ [Su et al., 2006], P_{B650} [Watanabe and Oya, 1986]) имеет удивительное сход-

ство с вариациями P_{He^+} южного полушария зимнего периода.

В целом, результаты проведенного исследования позволяют заключить, что с поправкой на сезонность и особенности хода магнитного поля в разных полушариях обнаружено сходство долготных статистических характеристик субпровалов в концентрации He^+ и ионосферных неоднородностей, типичных для экватора (EFI, RFS, EFS, и EPV). Таким образом, исходное предположение о подобии статистических характеристик полностью подтвердилось. Следовательно, можно заключить, что получено еще одно свидетельство общности природы вышеназванных явлений. Еще раз подтверждено, что области пониженной концентрации He^+ (субпровалы) правомерно связывать с плазменными “пузырями” экваториального происхождения, видимыми на высотах верхней ионосферы в концентрации He^+ .

Авторы благодарят Комитет по научно-технической разработке ISS (ISS Research and Operation Committee) (Япония) за предоставленную возможность использовать данные спутника ISS-b в настоящем исследовании. Авторы выражают искреннюю благодарность профессорам Ю.Я. Ружину и А.Т. Карпачеву (Россия), М.А. Abdu and Y. Saha (Бразилия), R.F. Woodman (Перу), Т. Maruyama (Япония) за участие в обсуждении результатов и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука. 191 с. 1990.
- Ершова В.А., Сивцева Л.Д., Кранье Ж., Блан Е., Сово Ж.-А. Геофизические результаты масс-спектрометрических измерений // Космич. исслед. Т. 15. Вып. 2. С. 277–285. 1977.
- Деминова Г.Ф. Волнообразная структура долготных изменений ночной экваториальной аномалии // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 4. С. 169–173. 1995.
- Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Выделение провала и субпровала в концентрации легких ионов по данным спутника “ISS-b” на высоте ~1100 км // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 3. С. 54–61. 1999.
- Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Зависимость вероятности наблюдения среднеширотного провала и низкоширотного субпровала в концентрации ионов He^+ от сезона, местного времени и магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 2. С. 23–33. 2000а.
- Карпачев А.Т., Сидорова Л.Н. Долготные вариации вероятности наблюдения провала и субпровала в концентрации ионов He^+ для ночных условий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 5. С. 52–62. 2000б.
- Сивцева Л.Д., Ершова В.А. Особенности распределения концентраций ионов водорода в среднеширотной ионосфере / Связь ОНЧ-излучений верхней атмосферы с другими геофизическими явлениями. Сб. науч. тр. Якутск: ЯФ СО АН СССР. С. 133–142. 1977.
- Сивцева Л.Д., Ершова В.А., Мосова З.А. Низкоширотный провал ионов водорода во внешней ионосфере // Бюллетень научно-технической информации. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. С. 39. 1982.
- Сидорова Л.Н. Экваториальные плазменные “пузыри” на высотах верхней ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 1. С. 60–69. 2008.
- Abdu M.A., Batista I.S., Sobral J.H.A. A new aspect of magnetic declination control of the equatorial spread F and F region dynamo // J. Geophys. Res. V. 97. № A 103. P. 14,897–14,904. 1992.
- 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 electrodynamics relevant to spread F // J. Atmos. Terr. Phys. V. 63. № 9. P. 869–884. 2001.
- Aggson T.L., Maynard N.C., Hanson W.B., Saba Jack L. Electric field observations of equatorial bubbles // J. Geophys. Res. V. 97. P. 2997–3002. 1992.
- Basu Su., Basu S., Khan B.K. Model of equatorial scintillation from in-situ measurements // Radio. Sci. V. 11. P. 821–826. 1976.
- Brace L.H., Maier E.J., Hoffman J.H., Whitteker J., Shepherd G.G. Deformation of the night side plasmasphere and ionosphere during the August 1972 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. V. 79. № 34. P. 5211–5218. 1974.
- Chen A.J., Grebowsky J.M., Taylor H.A. Dynamics of mid-latitude light ion trough and plasma tails // J. Geophys. Res. V. 80. № 7. P. 968–976. 1975.
- Chen A.J., Wolf R.A. Effects on the plasmasphere of a time-varying convection electric field // Planet. Space Sci. V. 20. № 4. P. 483–505. 1972.
- Fang T.-W., Kil H., Millward G., Richmond A.D., Liu J.-Y., Oh S.-J. Causal link of the wave-4 structures in plasma density and vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere // J. Geophys. Res. V. 114. № A10315. doi: 10.1029/2009JA014460. 2009.
- Jin H., Miyoshi Y., Fujiwara H., Shinagawa H. Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure // J. Geophys. Res. V. 113. № A09307. doi: 10.1029/2008JA013301. 2008.
- Karpachev A.T., Sidorova L.N. Occurrence probability of the light ion trough and subtrough in He^+ density on season and local time // Adv. Space Res. V. 29. P. 999–1008. 2002.
- Karpachev A.T., Sidorova L.N. Distinction and classification of the troughs and subtroughs in He^+ density from ISS-b satellite data at 1000–1200 km altitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. P. 997–1006. 2003.
- Kil H., Talaat E.R., Oh S.-J., Paxton L.J., England S.L., Su S.-J. Wave structures of the plasma density and vertical

- $E \times B$ drift in low-latitude F region // *J. Geophys. Res.* V. 113. № A09312. doi: 10.1029/2008JA013106.2008.
- Lühr H., Hässler K., Stolle C. Longitudinal variation of F region electron density and thermosphere zonal wind caused by atmospheric tides // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L16102. doi: 10.1029/2007GL030639. 2007.
 - Maryama T., Matuura N. Global distribution of occurrence probability of spread echoes based on ISS-b observation // *RRL.V.* 27. № 124. P. 201–216. 1980.
 - Maruyama T., Matuura N. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles // *J. Geophys. Res.* V. 89. № A12. P. 10,903–10,912. 1984.
 - McClure J.P., Singh S., Bamgboye D.K., Johnson F.S., Kil H. Occurrence of equatorial F region irregularities: Evidence for tropospheric seeding // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A12. P. 29,119–29,135. 1998.
 - 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. V. 4. 1985.
 - Sidorova L.N., Ruzhin Yu.Ya. Peculiarities of the low-latitude trough in He^+ during high solar activity period. Abstr. 31st Scientific Assembly of COSPAR. The University of Birmingham, England. P. 91. 14–21 July, 1996.
 - Sidorova L.N. He^+ density topside modeling based on ISS-b satellite data // *Adv. Space Res.* V. 33. P. 850–854. 2004.
 - Sidorova L.N. Plasma bubble phenomenon in the topside ionosphere // *Adv. Space Res. Special issue (COSPAR)*. doi: 10.1016/j.asr.2007.03.067. 2007.
 - 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.
 - Su S.-Y., Liu C.H., Ho H.H., Chao C.K. Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities: Equatorial versus midlatitude regions // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A06305. doi: 10.1029/2005JA011330. 2006.
 - Taylor H.A. Jr., Grebowsky J.M., Walsh W.J. Structured variations of the plasmopause: Evidence of a corotating plasma tail // *J. Geophys. Res.* V. 76. № 28. P. 6806–6814. 1971.
 - Taylor H.A., Cordier G.R. In situ observations of irregular ionospheric structure associated with the plasmopause // *Planet. Space Sci.* V. 22. № 9. P. 1289–1296. 1974.
 - Tsunoda R.T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in untegrated E region Pedersen conductivity // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 447–456. 1985.
 - 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.