

УДК 621.396.96+550.388.2

СПОРАДИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗАТМЕННОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ НА СПУТНИКОВЫХ ТРАССАХ GPS—FORMOSAT-3

С. С. Матюгов *, *О. И. Яковлев*, *А. Г. Павельев*, *А. А. Павельев*, *В. А. Ануфриев*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино Московской обл., Россия

Анализируются результаты выполненных в течение шести лет радиозатменных зондирований нижней ионосферы в двух экваториальных районах. Рассмотрены особенности изменений амплитуды принимаемых дециметровых радиоволн при радиопросвечивании спорадических структур разных типов на трассах спутник—спутник. Приведены зависимости высоты и толщины спорадического слоя E_s от времени суток. В разные сутки ночью существует один или одновременно два слоя: первый слой расположен на средней высоте 116 км, а второй — на высоте 96 км. В дневные часы высота первого слоя понижается, и вечером формируются неоднородные структуры, высота расположения которых случайным образом распределена в интервале от 90 до 100 км. Обсуждаются изменения амплитуды сигнала при высоте (перигее) лучевой линии 70÷85 км, когда осуществляется зондирование мезосферы. Приведена статистика наблюдений спорадических структур в районах Африки и Индонезии.

ВВЕДЕНИЕ

При работе станций высотно-частотного зондирования в нижней ионосфере нерегулярно наблюдаются тонкие слоистые или неоднородные спорадические слои E_s . Термин «спорадические» отражает непредсказуемость формы, времени и места появления, длительности существования и интенсивности таких структур. Интерес к изучению E_s -слоёв обусловлен их влиянием на условия связи в коротковолновом радиодиапазоне и стремлением выяснить связь процессов в нижней ионосфере с динамикой атмосферы. Многолетние исследования спорадических образований выявили разнообразие типов E_s -слоёв, свидетельствующее о сложной связи ионосферных и атмосферных процессов, влияющих на формирование таких структур в различных регионах. В монографиях [1–3] и обзорах [4, 5] приводятся подробные сведения о E_s -слоях в средних и высоких широтах и рассматриваются факторы, влияющие на их формирование: ветровой сдвиг, гравитационные и планетарные волны, приливные явления, конвекция в атмосфере, процессы в F -области ионосферы, плазменная неустойчивость, метеориты и другие. Множественность обсуждаемых причин формирования слоёв E_s затрудняет понимание того, какие из них являются главными, действуют ли они одновременно и можно ли выделить преимущественную причину их появления в разных районах Земли. Для ответа на эти вопросы нужно получить подробные данные о характеристиках и глобальном распределении E_s -слоёв.

Анализ особенностей глобального распределения спорадических структур стал возможен после развития радиозатменного метода зондирования ионосферы на трассах спутник—спутник. При заходе низкоорбитального спутника-приёмника за лимб Земли по отношению к высокоорбитальному спутнику-передатчику соединяющая их лучевая линия осуществляет почти вертикальное сечение ионосферы. Приёмник регистрирует амплитуду и фазу радиоволны, по которым

* ssm117@ire216.msk.su

определяются высотные профили параметров ионосферы и атмосферы в разных регионах Земли. Для этого используются навигационные спутники-передатчики системы GPS, излучающие высокостабильные сигналы на частотах $f_1 = 1\,575,42$ МГц и $f_2 = 1\,207,60$ МГц, и несколько низкоорбитальных спутников. В книгах [6, 7] изложены принципы и возможности радиозатменного мониторинга ионосферы и атмосферы. Эффективность радиозатменного метода для исследования глобального распределения E_s -слоёв и зависимости их параметров от широты, долготы, высоты, сезона и времени суток показана в работах [8–17]. В публикациях [18, 19] проведён анализ E_s -слоёв в полярных районах и показано, что они образуются при высыпании энергичных частиц, обусловленных воздействием ударной волны солнечного ветра. Результаты предварительного анализа спорадических структур экваториальной ионосферы по ограниченным данным затменного радиопросвечивания представлены в работах [20, 21].

Целью этой статьи является анализ частоты появления спорадических образований и вариаций их параметров в двух районах, расположенных южнее геомагнитного экватора и имеющих близкие магнитные наклонения и напряжённости магнитного поля, но различающихся климатическими условиями и грозовой активностью. Первый район расположен в Африке в пределах от 4° ю. ш. до 3° с. ш. и от 19° до 29° в. д. Второй район находится в Индонезии в пределах того же широтного пояса от 129° до 139° в. д. По данным [22] в интернете, в среднем за год наблюдений грозовая активность в первом районе во много раз выше, чем во втором. Мы проводим анализ особенностей спорадических структур экваториальной ионосферы, полученных в период 2007–2012 годов, по данным 4057 сеансов затменного радиопросвечивания.

1. ОСОБЕННОСТИ ЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СПОРАДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Создание радиозатменной системы, в которую входят 6 низкоорбитальных спутников-приёмников FORMOSAT-3 и 24 спутника-передатчика GPS, позволило осуществлять около 2000 зондирований ионосферы в сутки во всех регионах Земли. При анализе E_s -слоёв в экваториальной области мы использовали данные этой радиозатменной системы для двух экваториальных районов: первый район расположен в Африке, а второй — в Индонезии. Размеры каждого района составляют 800 на 1110 км; они различаются климатическими условиями и грозовой активностью.

Схема зондирования ионосферы приведена на рис. 1, где точка G — навигационный спутник, находящийся на высоте GG_1 , равной 20180 км, а точка F — спутник-приёмник сигналов, расположенный на высоте FF_1 , равной 800 км; затемнением выделена область нижней ионосферы, содержащая E_s -слои, а точка O соответствует центру Земли. При радиопросвечивании нижней ионосферы регулярная рефракция дециметровых радиоволн незначительна, и лучевые линии GF и GF_2 можно считать прямыми (точка F_2 соответствует положению спутника-приёмника на орбите в другой момент времени). Из-за различия орбитальных скоростей спутник F периодически заходит за лимб Земли по отношению к спутнику G , и лучевая линия осуществляет сечение ионосферы. Наибольшее воздействие на характеристики радиоволн оказывают участки трассы, на которых градиент показателя преломления среды перпендикулярен лучевой линии. При сферической симметрии среды центр такой области соответствует перигею луча (точке A). Высота перигея $H = AB$, а его географические координаты соответствуют точке B . Точки C_1 , C_2 обозначают пересечения лучевой линии GF с границами области расположения слоёв E_s , а точки D_1 , D_2 , D_3 и D_4 — пересечения лучевой линии GF_2 с этой областью.

Измерения амплитуды и фазы сигналов при зондировании нижней ионосферы и мезосферы осуществлялись с частотой отсчётов 50 Гц. Скорость dH/dt изменения высоты перигея луча в

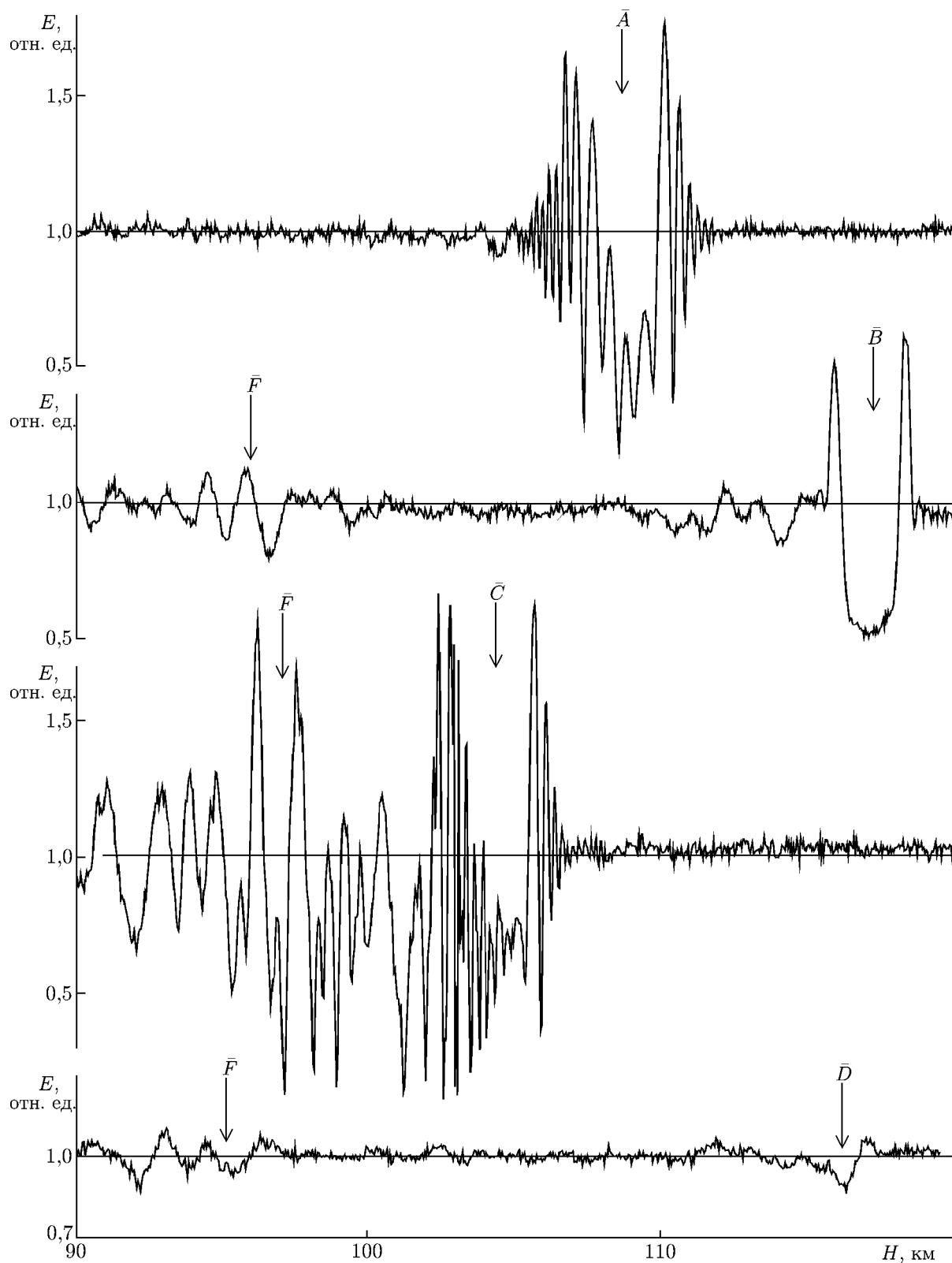


Рис. 2. Примеры изменений амплитуды сигнала E в зависимости от высоты лучевой линии при $H > 90$ км

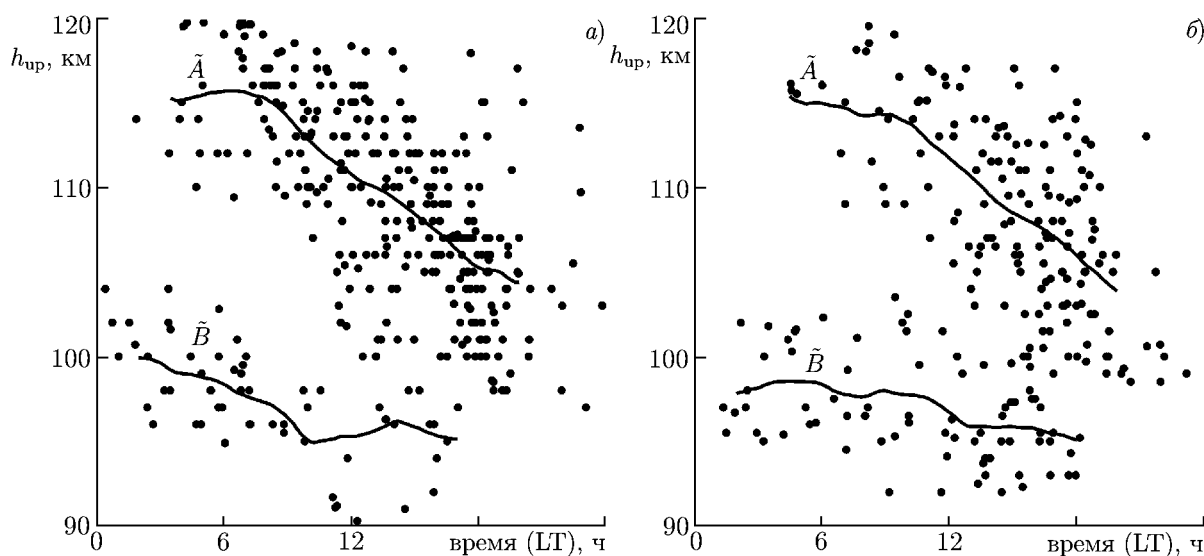


Рис. 3. Зависимости высоты верхней границы $h_{\text{ур}}$ от местного времени в первом (а) и во втором (б) районах

E_s -слоёв с различной интенсивностью. При зондировании тонких слоёв с высокой электронной концентрацией в зависимости $E(H)$ при уменьшении высоты H сначала наблюдаются типичные для дифракции Френеля периодические осцилляции амплитуды E , размах и период которых увеличиваются, затем регистрируется провал, т. е. уменьшение амплитуды сигнала (см. стрелки $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$ на рис. 2). При дальнейшем уменьшении высоты H амплитуда E возрастает, осциллируя, и достигает единичного уровня. Размах этих осцилляций, а также глубина и ширина провала амплитуды сигнала зависят от толщины слоя и электронной концентрации в нём, а период — от скорости dH/dt изменения высоты лучевой линии GF . При дальнейшем уменьшении высоты H часто наблюдаются квазипериодические или случайные вариации амплитуды E (стрелки $\tilde{F}$ на рис. 2), обусловленные влиянием либо неоднородностей слоя с большой горизонтальной протяжённостью, либо крупномасштабными неоднородностями, находящимися в стороне от перигея луча. Также наблюдаются слабые проявления спорадических структур с малыми изменениями функции $E(H)$. Пример такого изменения показан на нижней панели рис. 2, где в интервале $\tilde{D}$ видно увеличение амплитуды E до 1,07, последующее уменьшение до 0,87 и возвращение к уровню, равному единице. Такие малые вариации функции $E(H)$ регистрируются достаточно точно, т. к. уровень шумов мал.

По экспериментальным зависимостям $E(H)$ можно определить границы и толщину Δh плазменной структуры. Для интенсивных слоёв типа $\tilde{A}$, $\tilde{B}$ и $\tilde{C}$ на рис. 2 их границы определялись как высоты, соответствующие ближайшим к провалу максимумам амплитуды, а для слабовыраженных слоёв типа $\tilde{D}$ — как высоты двух соседних максимумов. Толщина размытых квазипериодических структур типа $\tilde{F}$ не определялась. На рис. 3 точками показана зависимость верхней границы спорадических образований $h_{\text{ур}}$ от местного времени (LT) для двух районов. Разброс экспериментальных значений $h_{\text{ур}}$ обусловлен изменчивостью высоты расположения слоёв E_s . Кривые на этих графиках получены методом скользящего среднего; видно, что среднеквадратичные вариации величины $h_{\text{ур}}$ не превосходят ± 4 км. Из рис. 3 следует, что наблюдаются два типа E_s -слоёв: высокие ($\tilde{A}$) и низкие ($\tilde{B}$); иногда одновременно присутствуют и высокие и низкие структуры. Высокие структуры при времени LT от 2 до 6 ч расположены на средней высоте $h_{\text{ур}} = 116$ км. При времени LT от 8 до 19 ч наблюдается регулярное уменьшение $h_{\text{ур}}$, в 19 ч высота $h_{\text{ур}} = 104$ км. Средняя скорость уменьшения величины $h_{\text{ур}}$ для высоких структур равна примерно

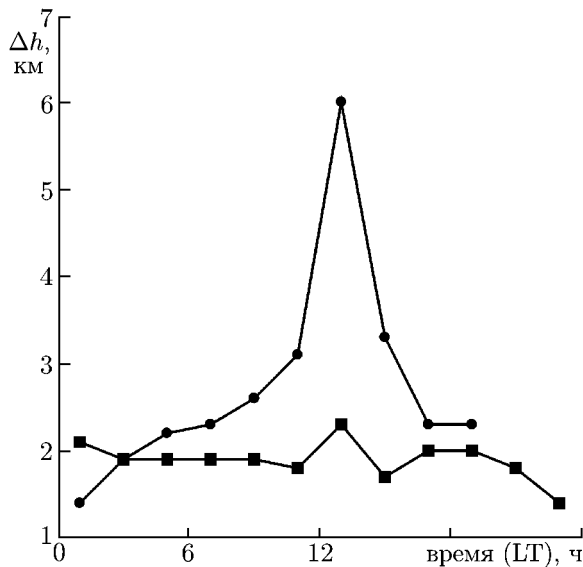


Рис. 4. Зависимости толщины слоя Δh от местного времени

отсутствует. В ночные, утренние и вечерние часы толщина высоких и низких слоёв примерно одинакова и в среднем равна 2 км.

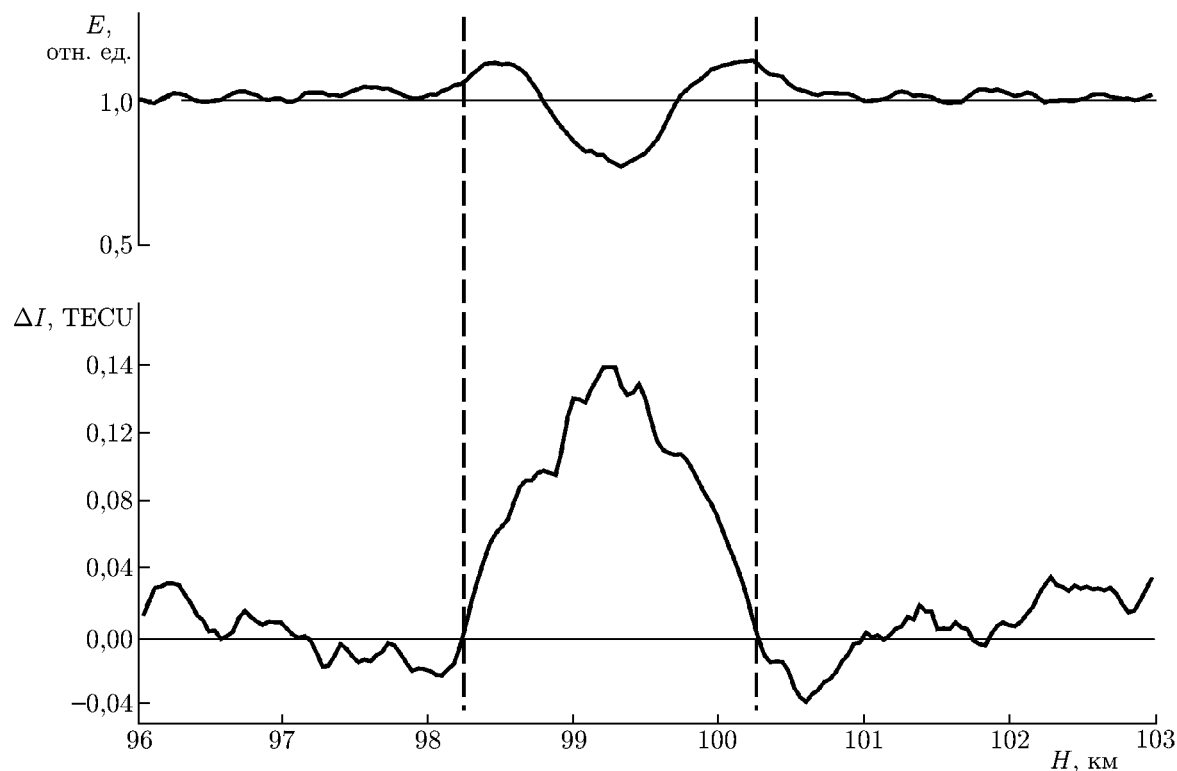
Оценим приращение электронной концентрации ΔN_e в спорадическом слое, используя результаты фазовых измерений. Это можно сделать двумя способами, имеющими примерно одинаковую точность. Оба способа применимы при условии локальной сферической симметрии E_s -слоя. Первый способ основан на применении интегрального преобразования Абеля для восстановления высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$, где h — реальная высота ионосферного слоя. Так как радиозатменные измерения начинаются при разной высоте перигея луча и начальное значение эйконала неизвестно, то для каждого сеанса измерений требуется отдельный подбор начальных условий на верхней границе, с которой начинается интегрирование. Результаты такого определения электронной концентрации и её вертикальных градиентов в спорадических слоях приведены в статьях [6, 7]. Второй способ более прост и основан на использовании результатов измерений разности приращений эйконалов когерентных сигналов с частотами f_1 и f_2 , по которой определяется зависимость интегральной электронной концентрации I от высоты H лучевой линии:

$$I[\text{м}^{-2}] = \frac{(f_1[\Gamma\text{ц}])^2 - (f_2[\Gamma\text{ц}])^2}{40,3(f_1[\Gamma\text{ц}]f_2[\Gamma\text{ц}])^2} (\psi_2[\text{М}] - \psi_1[\text{М}]), \quad (1)$$

где ψ_1 и ψ_2 — эйконалы сигналов, зависящие от высоты H . Для оценки приращения ΔN_e в E_s -слое по отношению к средней фоновой зависимости $\bar{N}_e(h)$ используем измерения амплитуды и приращения интегральной концентрации $\Delta I(H)$, обусловленного спорадическим слоем. Зависимость $\Delta I(H)$ определим как $\Delta I(H) = I(H) - I_0(H)$, где $I_0(H)$ — высотная зависимость интегральной электронной концентрации, обусловленная изменением средней концентрации $\bar{N}_e(h)$. Зависимость $I_0(H)$ определим путём сглаживания значений $\psi_1(H)$ и $\psi_2(H)$ методом скользящего среднего по 201 отсчёту, что соответствует окну с шириной около $8 \div 10$ км. На рис. 5 приведён пример высотных зависимостей амплитуды E и приращения интегральной электронной концентрации $\Delta I(H)$ при радиопросвечивании слоя E_s . Приращение ΔI выражено в TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Для уменьшения влияния высокочастотной составляющей шума зависимости $E(H)$ и $\Delta I(H)$ сглажены скользящим средним по трём отсчётам. Вертикальными пунктирными прямыми

1,3 м/с. Такие структуры присутствуют в 63 % сеансов радиопросвечивания ионосферы, в которых наблюдались спорадические образования. Низкие структуры регистрируются в 37 % случаев наблюдения E_s -слоёв, их высота в среднем равна 96 км и почти не зависит от времени суток. Вечером регистрируются слои на высоте $90 \div 102$ км.

Толщина слоёв определялась как разность высот верхней и нижней границ. По нашим оценкам, ошибка определения толщины слоя составляет $\pm 0,2$ км. На рис. 4 показаны средние за двухчасовые интервалы местного времени LT значения толщины слоя Δh . Точками показаны значения Δh для слоёв, находящихся на высоте от 100 до 120 км, а квадратами — на высоте от 90 до 100 км. Видно, что для высоких слоёв характерен максимум толщины в полуденные часы, а для низких суточная зависимость практически

Рис. 5. К оценке электронной концентрации слоёв E_s

ми на рис. 5 показаны границы слоя, определённые по амплитудным данным. Предположим, что тонкие спорадические слои имеют достаточно резкие границы и что соответствующее этим слоям приращение ΔN_e накладывается на среднюю высотную зависимость $\bar{N}_e(h)$, т. е. $N_e = \bar{N}_e(h) + \Delta N_e$. Для описания приращения электронной концентрации ΔN_e в слое такого типа хорошо подходит параболическая модель:

$$\Delta N_e = \begin{cases} N_m \left[1 - 4 \left(\frac{h - h_m}{\Delta h} \right)^2 \right], & h_m - \Delta h/2 < h < h_m + \Delta h/2; \\ 0, & h \leq h_m - \Delta h/2 \text{ или } h \geq h_m + \Delta h/2, \end{cases} \quad (2)$$

где N_m — дополнительная к средней электронная концентрация в максимуме слоя, h_m — высота максимума, а Δh — толщина слоя по расстоянию между его основаниями, т. е. на уровне средней электронной концентрации. В этом случае указанные на рис. 5 границы соответствуют максимальным значениям вертикальной компоненты градиента электронной концентрации. Оценка ΔN_e снизу определяется соотношениями

$$\Delta N_e(H) = \Delta I(H)/l, \quad l \approx 2(2a \Delta h)^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь l — максимальная длина участка эффективного взаимодействия радиоволны с E_s -слоем, a — радиус Земли. В интервале высот перигея 90÷130 км длина $l \approx 200$ км. Для приведённого на рис. 5 примера максимальное значение ΔN_e в слое равно $4,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Эта оценка величины ΔN_e может корректироваться в сторону увеличения в 2–3 раза, если слоистая неоднородность занимает только часть отрезка C_1C_2 (рис. 1). Для слоёв $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$ и $\bar{D}$ на рис. 2 значения ΔN_e равны соответственно $3,6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$; $1,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$; $1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $0,26 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Таблица 1. Статистика активности E_s -слоёв на высотах $h > 90$ км

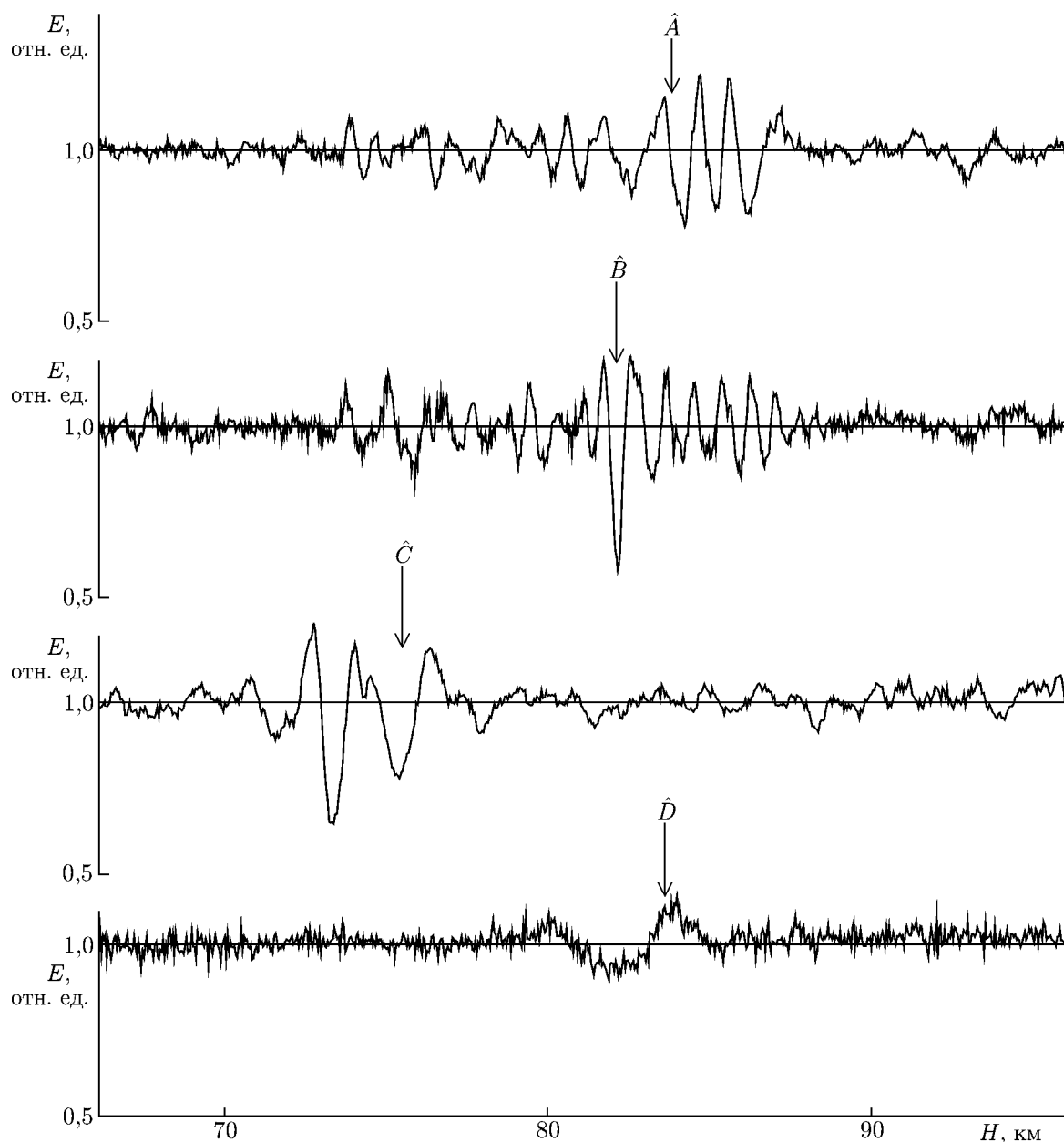
Год	2007		2008		2009		2010		2011		2012		Всего
Район	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Зондирования	442	452	422	410	425	372	328	302	260	271	202	171	4057
Слои E_s на высотах $90 \div 120$ км	358	368	336	314	371	284	280	235	228	219	179	151	3323
Слои E_s , %	81	81	80	76	87	76	85	78	88	81	89	88	82
Слои $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{D}$	146	167	226	111	217	125	176	123	135	82	92	62	1662
Слои $\bar{C}$, $\bar{F}$	212	201	110	203	154	159	104	90	89	137	60	90	1609
Слои $\bar{A}$ с вар-и	14	17	21	10	19	15	15	16	21	14	16	17	195
Слои E_s на высотах больше 100 км	243	226	199	181	251	150	201	137	172	122	120	96	2098
Слои E_s на $89 \div 100$ км	115	142	137	133	120	134	79	98	56	97	59	55	1225

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены данные о статистике наблюдений спорадических слоёв разных типов в двух районах на высотах $h > 90$ км. В первых двенадцати столбцах приведены сведения о слоях для 2007–2012 годов в районах 1 и 2, а в последнем столбце — суммарные данные по двум районам. В первой строке указан год проведения радиозатменного зондирования; во второй — район измерений (1 — Африка, 2 — Индонезия); в третьей — число зондирований в данном районе; в четвёртой — число наблюдаемых слоёв E_s , влияние которых на амплитуду и фазу сигнала проявляется в высотном интервале $90 \div 120$ км; в пятой — число наблюдений слоёв E_s , выраженное в процентах относительно числа зондирований данного района; в шестой — число слоёв E_s типа $\bar{A}$, $\bar{B}$ и $\bar{D}$ (рис. 2); в седьмой — число многослойных спорадических структур типа $\bar{C}$ и $\bar{F}$; в восьмой — число слоёв типа $\bar{A}$ с интерференционными вариациями амплитуды сигнала на верхней и/или нижней границе плазменного образования; в девятой — число слоёв E_s с верхней границей выше 100 км; в десятой — число слоёв с верхней границей на высотах от 89 до 100 км.

Приведённые в табл. 1 данные указывают на высокую частоту появления спорадических образований в обоих районах, достигающую в среднем за шесть лет наблюдений 82 % от числа всех зондирований. За этот период частота появления слоёв E_s над Африкой в среднем на 5 % выше, чем над Индонезией. Многослойные, квазипериодические структуры — структуры с горизонтальной протяжённостью более 200 км — составляют до 48 % всех наблюдаемых слоёв, а тонкие слои, вызывающие интерференционные изменения амплитуды сигнала и имеющие электронную концентрацию ΔN_e , превышающую 10^5 см^{-3} , — до 6 %. Верхняя граница для 63 % спорадических образований всех типов в разное время суток находится на высоте от 100 до 120 км. Средняя высота таких структур — примерно 116 км. Число спорадических образований, расположенных на высоте $h \geq 100$ км, в первом районе в разные годы на 10–30 % больше, чем во втором. Средняя высота и толщина плазменных образований, расположенных ниже 100 км, практически не зависят от местного времени. Суточная зависимость частоты появления спорадических образований всех типов выражена слабо: днём она на 10–15 % выше, чем ночью, а сезонные изменения активности не наблюдаются.

Рассмотрим далее проявления плазменных спорадических образований при $H < 90$ км. При

Рис. 6. Типичные изменения амплитуды радиоволн при $H < 90$ км

минимальной высоте лучевой линии $H = 70 \div 90$ км относительно редко наблюдаются характерные изменения амплитуды $E(H)$, обусловленные наличием на трассе GF плазменных образований. Они показаны на рис. 6, где стрелки $\hat{A}$ и $\hat{B}$ соответствуют сильно неоднородным структурам с толщиной $\Delta h = 7 \div 12$ км, а особенности $\hat{C}$ и $\hat{D}$ характерны для относительно тонких слоистых образований с $\Delta h = 2 \div 4$ км. Необходимо подчеркнуть, что на рис. 2 и 5 показаны зависимости амплитуды E сигнала от минимальной высоты лучевой линии H .

Истинная высота плазменных образований h в отдельных случаях может быть больше найденной высоты H . Это связано с тем, что эти образования могут находиться на лучевой линии не в районе перигея A , а где-то в интервалах $D_1 D_2$ или $D_3 D_4$ (рис. 1). Если допустить, что плазменные образования могут быть расположены в районах точек D_1 или D_4 , то отличие их

Таблица 2. Статистика наблюдений плазменных структур в пятикилометровых интервалах минимальной высоты лучевой линии H и высоты h при $H < 90$ км

Интервалы высот Δh , км	Число структур в интервале ΔH в районе 1	Число структур в интервале ΔH в районе 2	Общее число структур в интервале ΔH в двух районах	Вероятное число структур в интервале Δh
40÷45	36	62	98	0
45÷50	49	56	102	0
50÷55	43	74	116	16
55÷60	62	55	117	17
60÷65	57	67	124	24
65÷70	66	67	133	33
70÷75	74	64	138	38
75÷80	76	76	152	52
80÷85	94	74	168	68
85÷90	151	133	284	184

истинной высоты h от расстояния H может быть оценено из соотношения $h - H \approx L^2/(2a)$, где $L \approx AD_1 = AD_4$. Из этого следует, что при $H = 60$ км истинная высота плазменной структуры h может быть равной 100 км, если структура отстоит от области перигея на расстоянии $L \approx 700$ км. Следовательно, не всегда найденная высота H плазменного образования, имеющая значение от 60 до 90 км, соответствует его истинной высоте h , т. к. основное влияние на характеристики радиосигнала оказывает область, в которой градиент показателя преломления перпендикулярен лучевой линии, а влияние удалённых областей среды мало [23]. Проявление в амплитудных измерениях влияния плазменных структур при высоте перигея луча $H < 90$ км обычно связывают с наличием E_s -слоёв, расположенных в стороне от перигея A луча на рис. 1 и наклонённых к местному горизонту [13, 16, 23–25]. Таким слоям соответствует отличный от точки O на рис. 1 центр сферической симметрии среды.

Нельзя исключать и другую причину наблюдаемых эффектов. Для этого оценим вероятность наблюдений плазменных образований на высоте h при разных значениях H . В табл. 2 приведены сведения о числе наблюдений плазменных структур в высотных интервалах $\Delta h = \Delta H = 5$ км. В первом столбце таблицы указаны интервалы высот Δh , во втором и третьем — число наблюдений плазменных структур соответственно в первом и втором районах на пятикилометровом интервале высот ΔH , а в четвёртом столбце дано суммарное число наблюдений структур в первом и во втором районах. В высотных интервалах $\Delta H = 40 \div 45$ км и $\Delta H = 45 \div 50$ км в обоих районах зарегистрировано по 100 ± 2 спорадических образований, которые могли находиться на существенно большей высоте h . Видно, что при возрастании H происходит резкое увеличение числа наблюдений плазменных структур. Если предположить, что вероятность наблюдения ошибочно низких плазменных образований не зависит от высоты H , то можно допустить, что для любой высоты лучевой линии H на интервале $\Delta H = 5$ км могло присутствовать около 100 ложно низких структур. Определим число наблюдений плазменных структур за вычетом ста предположительно ложных, которые могли располагаться в стороне от перигея луча на большой высоте h . При такой грубой оценке найдём возможное число плазменных образований на истинной высоте h : оно указано в пятом столбце суммарно для двух районов. Видно, что в мезосфере на высотах $h = 80 \div 90$ км и $h = 70 \div 80$ км наблюдалось соответственно не менее 252 и 90 плазменных структур, т. е. 6% и 2% от общего числа (4057) радиозатменных зондирований.

Обратим внимание на оптические наблюдения со спутников разрядов молний до стратосфер-

ных высот и свечения атмосферных слоёв в мезосфере на высотах $50 \div 80$ км [26, 27]. В этих публикациях приведены сведения и подробная библиография работ по изучению со спутников вспышек света в области мезосферы. Эти вспышечные явления (transient luminous events, TLE) разделяют на четыре группы: эльфы, спрайты, гало, джеты. Эльфы — это слабые свечения узкого слоя на высоте около 90 км. Спрайты — это сложные светящиеся структуры, у которых в области высот $h = 45 \div 70$ км расположена зона стримеров (ярких ветвящихся образований), а выше, при $h = 75 \div 86$ км, наблюдается слабосветящаяся диффузная область с типичной горизонтальной протяжённостью $20 \div 40$ км. Гало — это похожее на сплюснутый эллипсоид яркое образование с горизонтальными размерами в несколько десятков километров, которое регистрируется на высотах $h = 60 \div 75$ км. Часто это образование бывает разделено на несколько меньших светящихся областей. Джеты — это яркие голубые структуры, представляющие собой направленный вверх узкий канал, который на высотах $60 \div 70$ км часто разбивается на ветви. Редкие, особо интенсивные гигантские джеты простирают ветви до высоты 85 км.

В период с июля 2004 года по июнь 2007 года была осуществлена регистрация TLE с помощью спутника FORMOSAT-2 [27]. На этом спутнике была установлена система оптических приборов, которая позволяла регистрировать TLE в широком поясе от 45° ю. ш. до 45° с. ш. За трёхлетний период было зарегистрировано 5 434 эльфы, 633 спрайта, 657 гало и только 13 интенсивных джетов. Исследования показали, что наиболее частые проявления TLE в мезосфере — это эльфы, спрайты и гало, возникающие под влиянием электромагнитных импульсов, сопровождающих разряды молний. Исследования TLE в мезосфере не позволяют дать надёжную оценку электронной концентрации в таких структурах. Нельзя исключить, что электронная концентрация в этих образованиях достаточна для их регистрации методом радиопросвечивания.

В работе [28] представлены результаты анализа различных данных о вертикальном профиле электронной концентрации в областях E и D ионосферы в средних широтах, включённые в модель ионосферы IRI, согласно которым на высоте $h = 90$ км электронная концентрация в дневное время составляет в среднем 10^4 см $^{-3}$, убывает до 10^3 см $^{-3}$ при $h = 85$ км, а на высоте $h = 70$ км она составляет всего лишь 10^2 см $^{-3}$. В то же время в работах [29, 30] на основе определений электронной концентрации в нижней ионосфере методом низкочастотного радиопросвечивания с использованием геофизических ракет показано, что на высотах $75 \div 85$ км электронная концентрация может быть в 10 раз больше, чем это следует из модели IRI.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённые сведения о параметрах слоёв E_s на высотах $h > 90$ км надёжны и не противоречат результатам исследований спорадических образований экваториальной ионосферы [5, 31], осуществленных с помощью станции высотно-частотного зондирования в Аресибо ($18,3^\circ$ с. ш., $66,7$ з. д.) . В этих работах указывается на существование двух слоистых образований E_s в ночное время и наличие одного сильно размытого по высоте E_s -слоя днём, а приведённые значения высоты этих слоёв и их изменений в течение суток хорошо соответствуют нашим данным для высот $h > 90$ км.

Исследования плазменных структур в мезосфере на высотах $h < 90$ км были затруднены из-за недостаточной разрешающей способности затменного радиопросвечивания вдоль лучевой линии. Совокупность наших данных и данных в [26–30] указывает на существование в мезосфере на высотах $70 \div 85$ км плазменных образований с электронной концентрацией, превосходящей соответствующую величину, которая следует из модели ионосферы IRI.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-02-00526-а) и Программы № 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чавдаров С. С., Часовин Ю. К., Чернышева С. П., Шефтель С. П. Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. М.: Наука, 1975. 119 с.
2. Гершман Б. Н., Игнатьев Ю. А., Каменецкая Г. Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя E_s на различных широтах. М.: Наука, 1976. 108 с.
3. Мизун Ю. Г. Нижняя ионосфера высоких широт. Л.: Наука, 1983. 248 с.
4. Whitehead J. D. // J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V. 51, No. 5. P. 401.
5. Mathews J. D. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 4. P. 413.
6. Яковлев О. И., Павельев А. Г., Матюгов С. С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS, 2010. 208 с.
7. Liou Y. A., Pavelyev A. G., Matyugov S. S., et al. Radio occultation method for remote sensing of the atmosphere and ionosphere. Vukovar, Croatia: InTech, 2010. 170 p.
8. Hocke K., Igarashi K., Nakamura M., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 1973.
9. Wu D. L., Ao C. O., Hajj G. A., et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. no. A01306.
10. Pavelyev A., Tsuda T., Igarashi K., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V. 65. P. 59.
11. Arras C., Jacobi C., Wickert J. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2555.
12. Arras C., Jacobi C., Wickert J., et al. // Adv. Radio Sci. 2010. V. 8. P. 225.
13. Wickert J., Pavelyev A. G., Liou Y. A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31, No. 12. Art. no. L24801.
14. Liou Y. A., Pavelyev A. G. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, No. 23. Art. no. L23102.
15. Pavelyev A. G., Liou Y. A., Wickert J., et al. // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 224.
16. Zeng Z., Sokolovskiy S. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. no. L18817.
17. Yeh W.-H., Huang C.-Y., Hsiao T.-Y., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2012. V. 117. Art. no. A11.
18. Яковлев О. И., Матюгов С. С., Ануфриев В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 181.
19. Yakovlev O. I., Wickert J., Pavelyev A. G., Anufriev V. A. // Acta Astronautica. 2010. V. 67. P. 315.
20. Матюгов С. С., Яковлев О. И., Ануфриев В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 3. С. 181.
21. Yakovlev O. I., Wickert J., Pavelyev A. G., et al. // Acta Astronautica. 2008. V. 63. P. 1350.
22. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Lightning_Frequency.png.
23. Павельев А. Г., Викерт Й., Лиу Й. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 1. С. 1.
24. Павельев А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 363.
25. Павельев А. Г., Занг К., Ванг С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 186.
26. Chen A. B., Kuo C. L., Lee Y. J., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. A08306.
27. Pasko V. P. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A00E35.
28. Bilitza D. // Adv. Space Res. 1998. V. 21. P. 871.
29. Ishisaka K., Okada T., Murakami S., et al. // Earth Planets Space. 2005. V. 57. P. 879.
30. Nagano I., Okada T. // Adv. Space Res. 2000. V. 25. P. 3.
31. Mathews J. D. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, No. 5. P. 673.

Поступила в редакцию 11 июня 2014 г.; принята в печать 17 сентября 2014 г.

SPORADIC FORMATIONS IN THE EQUATORIAL IONOSPHERE FROM THE GPS — FORMOSAT-3 RADIO OCCULTATION EXPERIMENTS

S. S. Matyugov, O. I. Yakovlev, A. G. Pavelyev, A. A. Pavelyev, and V. A. Anufriev

We analyze the results of the radio occultation experiments which were carried out for six years in two equatorial regions of the lower ionosphere. The features of the decimeter radio-wave amplitude variations are considered for the case of remote sensing of the different sporadic structures along the radio paths between two satellites. The diurnal dependences of the height and thickness of the E_s layer are presented for different time intervals. It is shown that in different days in the nighttime the E_s -layer plasma structures can exist in the form of a single layer or in the form of two layers simultaneously. The first layer is located at an average altitude of 116 km, while the second one, at 96 km. It was found that in the daytime the height of the first layer decreases, while in the evening, irregular structures are formed at altitudes distributed randomly between 90 and 100 km. The amplitude variations of the sounding signals are discussed for the cases where the distance (in the perigee) of the radio ray path from the Earth's surface is between 70 and 85 km in the mesosphere. Statistics of the sporadic structure occurrence is given for the regions located in Africa and Indonesia.