

АНОМАЛЬНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

© 2013 г. Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко

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

e-mail: givi@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.02.2011 г.

После доработки 06.05.2013 г.

По данным вертикального зондирования на “ст. Москва” обнаружено существование аномальных ионосферных отражений, наблюдающихся на высотах 100–200 км и не “привязанных” к основному $Ne(h)$ -профилю ионосферы. Приводятся морфологические характеристики таких отражений: суточные, сезонные и циклические зависимости вероятности их появления.

DOI: 10.7868/S0016794013050064

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, ионосфера Земли имеет слоистую структуру и подразделяется на несколько регулярных слоев (D , E , $F1$, $F2$) с достаточно хорошо прогнозируемыми пространственно-временными вариациями электронной концентрации в их максимумах. Кроме того, на высотах 100–130 км наблюдается нерегулярный (спорадический) слой Es , в свою очередь, подразделяющийся на типы f , l , c , h , a , r и т.д., свойства которых также хорошо изучены.

Новая высококачественная измерительная техника вертикального зондирования ионосферы (цифровой ионозонд “Парус”), функционирующая в ИЗМИРАН с 2005 г., позволила обратить внимание на существование аномальных отражений (АО) неизвестного ранее типа. Высотное распределение электронной концентрации – $Ne(h)$ в них отличается следующими специфическими особенностями.

Они, чаще всего, не составляют единого целого с “основным” $Ne(h)$ -профилем ионосферы. В таких случаях, между ним и следами отражений необычного типа (АО) существуют разрывы от долей до единиц МГц. На ионограммах вертикального зондирования (ВЗ) аномальные отражения нередко наблюдаются на частотах, превышающих $f_x F2$, но указать верхнюю частотную границу их появления в настоящее время затруднительно. (Ввиду низкой солнечной активности диапазон зондирования в 2005–2010 гг. составлял 1–8 МГц. Временами было очевидно, что частота аномальных отражений превышала эту верхнюю частотную границу).

Высота появления АО варьирует от 100 до 200 км. Они имеют самую разнообразную форму.

Иногда это достаточно плотные следы, занимающие частотный диапазон в пределах нескольких мегагерц. Но чаще они имеют рыхлую (облачную) или слоистую структуру, представляя собой как бы некие вкрапления в “тело” ионосферы сгустков плазмы большой плотности, но малых размеров.

Время и вероятность их появления носит спонтанный характер. Данное обстоятельство как будто сближает их со “стандартными” спорадическими слоями Es . Однако, во-первых, явление АО имеет место как при наличии отражений от Es , так и при их отсутствии. Во-вторых, АО не подходят ни под одно описание, известное как среднеширотный Es . В частности:

а) толщина различных типов Es -слоев, как правило, не превышает 3–5 км, тогда как АО могут охватывать высотный диапазон в несколько десятков километров;

б) высотный “потолок”, которым ограничивается образование Es -слоев в средних широтах, не превышает 120–130 км. Действующие высоты АО могут достигать, как говорилось, 200 км;

в) количество кратных отражений аномального типа иногда превосходит количество кратников от Es в случае, когда и то, и другое наблюдается одновременно;

г) при одновременном появлении АО и Es действующие высоты отражений от них различаются порой на десятки км.

О том, что аномальные отражения не связаны с качеством измерительной техники и/или антенно-фидерной системы свидетельствуют два факта. Во-первых, как показывает анализ данных, полученных с помощью аналогового ионозонда “SP-3”, с помощью которого проводилось зондирование ионосферы до 1995 г., АО наблюдались и

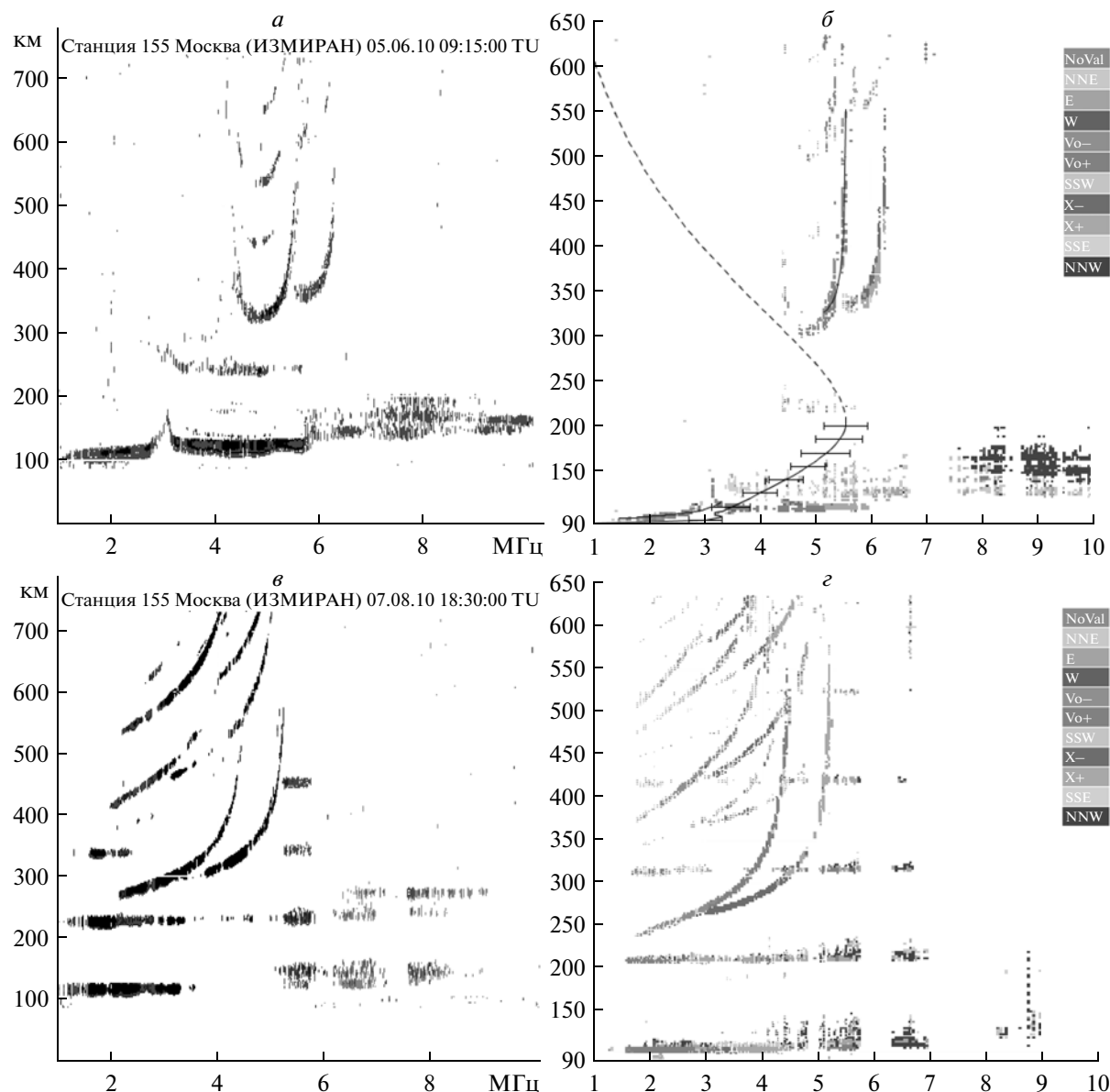


Рис. 1. Ионограммы со следами аномальных отражений, полученными на ионозондах “Парус” – а, в и “DPS-4” – б, г.

в прежние годы. Во-вторых, они регистрируются одновременно на ионограммах цифровых ионозондов “Парус” и “DPS-4”, функционирующих на полигоне ИЗМИРАН, при их синхронной (точнее – со сдвигом в 1–2 мин) работе. На рисунке 1 в качестве примера приведены ионограммы с хорошо выраженными АО, зарегистрированными в один и тот же момент обоими ионозондами. Они, как легко видеть, полностью идентичны. Судя по данным ионозонда “DPS-4”, сигналы, формировавшие АО 05.06.2010 г., приходили в основном с северо-северо-запада, северо-северо-востока и отчасти сверху (когда отклонение от вертикали не превышало 20°) – рис. 1а, 1б. В другом случае – 07.08.2010 г. аномальные от-

ражения приходили сверху, а также с северо-северо-востока и с северо-северо-запада – рис. 1в, 1г. То, что значительная часть их массива составляли сигналы, приходящие сверху, подтверждается наличием трех кратных отражений в диапазоне частот 5–6 МГц. Таким образом, вероятность того, что АО представляют собой какой-либо артефакт, исключается. Цель настоящей работы состоит в анализе морфологии этого явления.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования особенностей проявления АО проведена обработка данных 15-минутных измерений методом ВЗ на “ст. Москва” за период

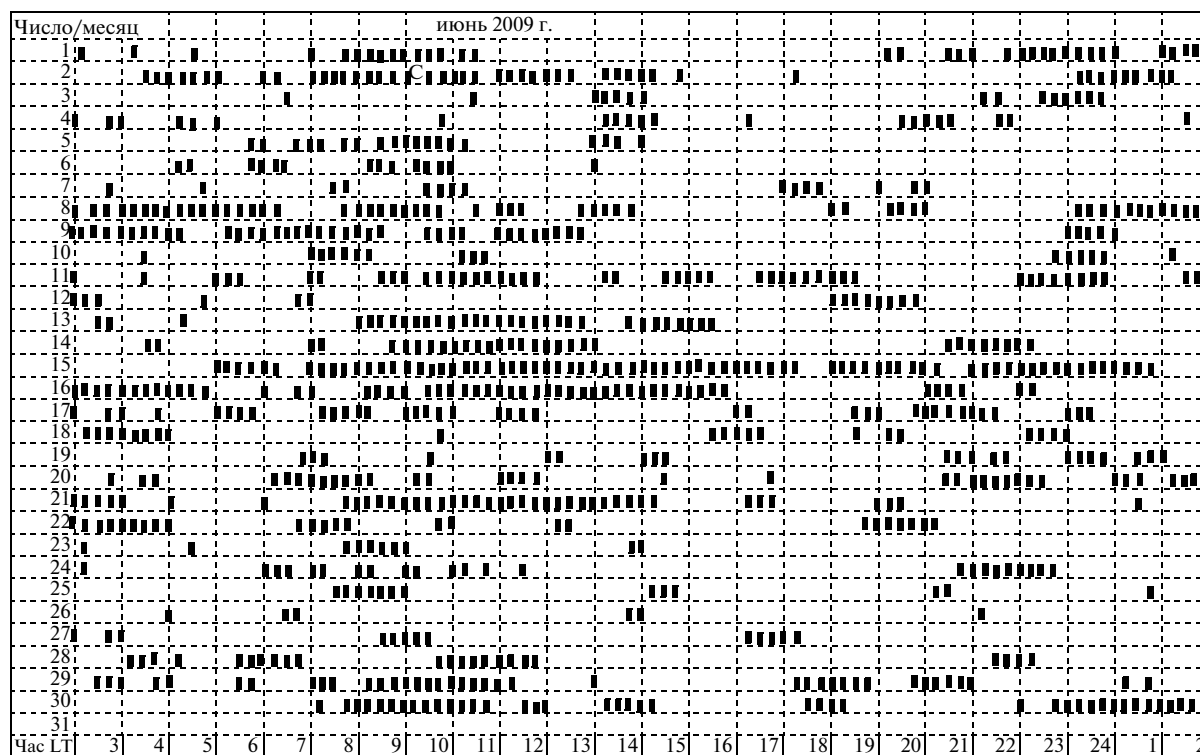


Рис. 2. Пример обработки АО по ионограммам вертикального зондирования. (Каждый столбик свидетельствует о наличии АО в данном 15-минутном сеансе зондирования).

2005–2010 гг. (цифровой ионозонд “Парус”). Также были обработаны ионограммы, полученные в более ранние годы (аналоговый ионозонд “SP-3”) за летний период (июнь). Пример соответствующей обработки представлен на рис. 2, на котором отмечены моменты регистрации АО. Далее по этим данным подсчитывались суммарные среднемесячные значения появления АО, а также их среднемесячные значения в пределах каждого часа. Количество обработанных ионограмм по годам и месяцам приводится в таблицах 1 и 2. Всего за период 2005–2010 гг. было обработано 157283 ионограммы.

3. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

По обработанным данным рассчитывались среднемесячные значения параметра вероятности появления АО — $P_{АО}$, характеризующего частоту их обнаружения по отношению к общему числу сеансов измерений за данный месяц (в %). На рисунке 3 показаны сезонные изменения значений $P_{АО}$ за каждый рассматриваемый год. Из рисунка можно видеть, что характер $P_{АО}$ повторяется из года в год с максимумом, приходящимся на летний период (июнь–август). Вместе с тем, при детальном анализе изменений частоты появ-

Таблица 1. Число обработанных 15-минутных сеансов за 2005–2010 гг., полученных на ионозонде “Парус”

Год	F10.7	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	91.7						2880	1803	2976	1124	1702	2500	2375
2006	80			2858	2851	2947	2810	892	2210	2848	2440		
2007	73.1	2247	2415	2952	1942	2516	2050	1856	997	2381	2749	1842	1710
2008	69	2963	2860	2360	1933	2854	2754	2971	2743	2416	2655	2683	2792
2009	71	2513	2579	2811	2430	2455	2876	2678	2968	2880	2971	2868	2875
2010	80.1	2972	2239	1988	2314	2002	2733	2976	2966	2875	2976	2874	2787

Таблица 2. Количество ионограмм ионозонда “SP-3”, обработанных за июнь в годы минимума и максимума солнечной активности

Минимум С.А.			Максимум С.А.		
Год	F10.7	Количество ионограмм	Год	F10.7	Количество ионограмм
1964	69	2418	1969	162.2	2839
1975	69.7	2816	1970	154.9	2867
1976	70.8	2877	1979	180.3	2830
1985	76.1	2841	1980	193.2	2849
1986	67.6	2777	1989	239.6	2231
1995	78.1	2865	1990	170.9	2369

ления АО в течение года оказывается, что наблюдается слабо выраженный полугодовой ход $P_{АО}$, при котором выявляются два четких минимума — глубокий весенний (март—апрель) и менее отчетливо выраженный — осенний (сентябрь); летний максимум $P_{АО}$ существенно превосходит зимний. (Зимой 2007—2008 гг. наблюдалась особенность, при которой частота появления АО зимой была близкой к летним значениям).

4. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ

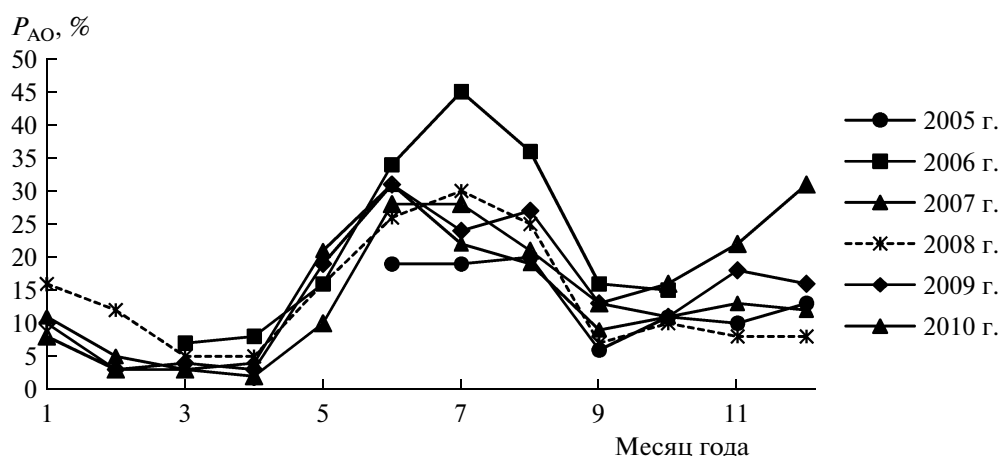
Анализ суточных вариаций $P_{АО}$ за каждый месяц показал, что их характер зависит от сезона. На рисунке 4 представлены средние за шестилетний период наблюдения $P_{АО}$ в равноденствия (март, апрель, сентябрь), зимой (декабрь—февраль) и летом (июнь—август). Как видно из рисунка, суточный год $P_{АО}$ слабо выражен в равноденствия, заметен зимой и велик летом. Кроме того, можно видеть, что в летние месяцы частота регистрации АО имеет два суточных максимума появления: с 08 до 11 LT и с 20 до 02 LT. В зимнее время тоже выделяются два максимума $P_{АО}$ (04—07 LT) и (17—

21 LT). При этом суточные вариации частоты появлений АО летом и зимой противофазны друг другу, а равноденствия представляют собой как бы переходной процесс между ними.

5. ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Данные, полученные с помощью цифрового ионозонда “Парус”, относятся к периоду низкой солнечной активности ($F10.7 = 65-95$). Обработанный архивный материал по “ст. Москва”, полученный на ионозонде “SP-3” (см. табл. 2) относится к более ранним годам как низкой, так и высокой солнечной активности. К сожалению, качество старых аналоговых ионограмм затрудняет выделение рассматриваемых АО, особенно слабых. Для анализа был выбран июнь, поскольку летом, как отмечалось выше, они чаще наблюдаются. В таблице 2 приведено распределение по годам 32579-ти обработанных ионограмм.

Поскольку выбран один месяц, то для анализа зависимости от солнечной активности рассматривались суточные изменения в частоте появле-

**Рис. 3.** Сезонные вариации вероятности появления АО.

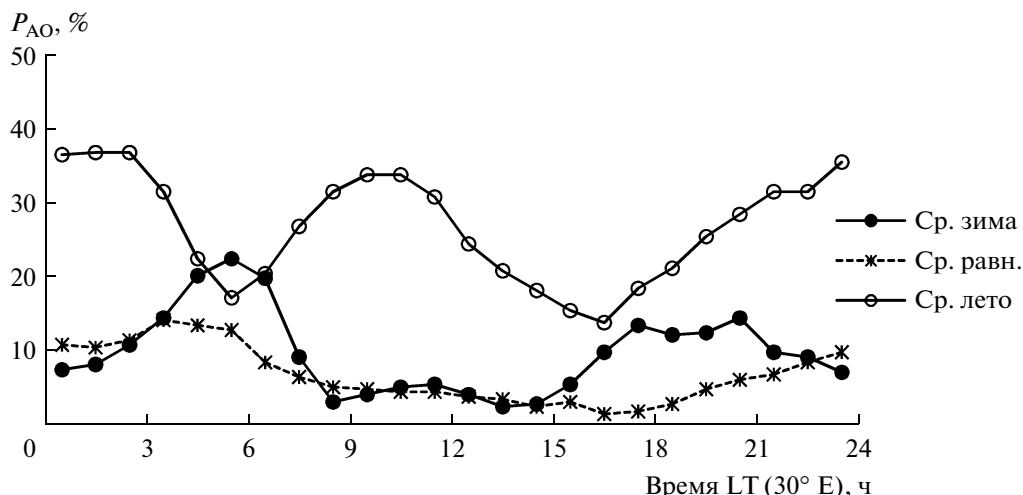


Рис. 4. Суточный ход P_{AO} в разные сезоны года.

ния АО. На рисунке 5 представлены значения вероятности их появления, усредненные для каждого из двух периодов солнечной активности, именно: для низкой ($F10.7$) $_{ср} = 75$ и высокой ($F10.7$) $_{ср} = 184$ (1960–1990 гг.), а также для периода минимума в 2005–2010 гг. – ($F10.7$) $_{ср} = 77$. Если сравнивать между собой данные за более ранние годы наблюдений, полученные при разных уровнях солнечной активности, то видим, что при высокой солнечной активности в дневное время (08–14 LT) АО наблюдаются заметно реже, чем в эти же часы при низкой солнечной активности. Обусловлен этот факт зависимостью от солнечной активности или нет, остается под вопросом и требует дальнейшего исследования на материалах, полученных современной аппаратурой. При сравнении ранних данных с современными за периоды минимума солнечной активности форма суточного хода P_{AO} остается практически неизменной, но создается впечатление, что образования типа АО в последние годы стали появляться чаще на протяжении всех суток. Однако не исключено, что это связано с разным качеством сравниваемых данных, полученных на разных типах ионозондов.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Явление АО можно интерпретировать как формирование на высотах области E сгустков плазмы, имеющих ячеистую или облачную структуру. Суточная и сезонная зависимость вероятности их появления хорошо коррелирует с суточной и сезонной зависимостями вероятности появления отражений от спорадических слоев E_s типов f , l и c . Особенно велика эта корреляция между сезонными вариациями P_{AO} и P_{Es} – вероятности появления Es , достигающая 0.909. Это хорошо вид-

но из рис. 6, где приведены сезонные изменения P_{AO} (из рис. 2, средние за период 2005–2010 гг.) и P_{Es} из работы [Чавдаров и др., 1975, см. рис. 13]. С другой стороны, абсолютные значения P_{AO} в ~2 раза ниже P_{Es} зимой и в ~4 раза летом.

Для сравнения между собой суточных вариаций P_{AO} и P_{Es} , были рассмотрены оригинальные данные по “ст. Москва” за два месяца – февраль и июнь 2009 г. – рис. 7а, 7б. Их анализ показывает, что летом характер суточных вариаций обоих параметров подобен, но вероятность появления АО запаздывает относительно вероятности появления Es на ~2 ч. В последнем случае корреляция между ними составляет 0.42. (Отметим, что суточный ход P_{Es} , полученный нами, согласуется с данными работы [Чавдаров и др., 1975, см. рис. 15]). Что же касается февраля, то P_{Es} составляет 20–30%, в то время как P_{AO} близко нулю в течение большей части суток. Тем не менее, между ними

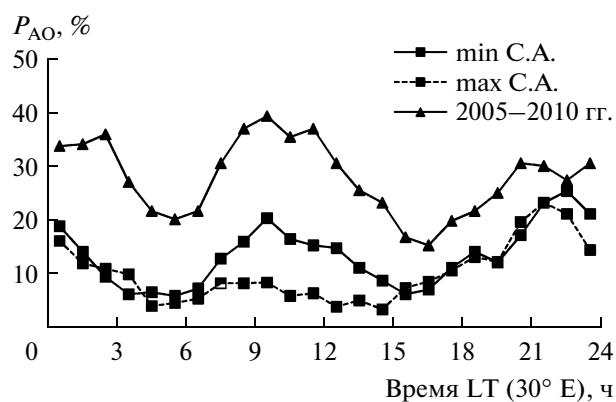


Рис. 5. Суточный ход частоты появлений АО летом при разных уровнях солнечной активности (С.А.).

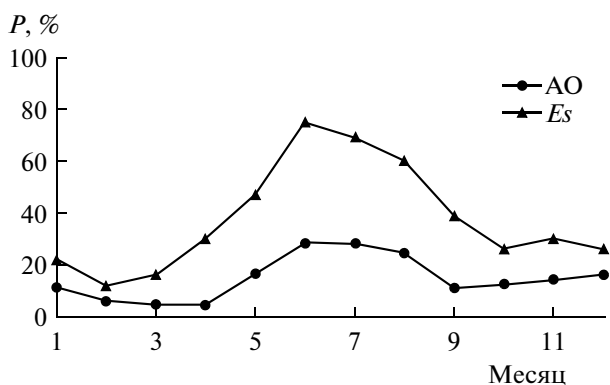


Рис. 6. Сезонный ход P_{AO} , усредненный за период 2005–2010 гг., и P_{Es} – за 1958–1960 гг.

заметна достаточно уверенная противофазная связь с коэффициентом корреляции, достигающим значения -0.61 .

Следует также обратить внимание на тот факт, что характер сезонных и циклических вариаций частоты появления АО весьма близок соответствующим вариациям частоты появления серебристых облаков (СО) [Бронштэн, 1984; Ромейко и др., 2002]. Основное различие между ними проявля-

ется в отношении суточных вариаций. Максимум частоты появления АО в летние месяцы приходится не только на ночные, но и на околополуденные часы. Серебристые же облака регистрируются лишь в сумеречные и ночные часы. Правда, это обстоятельство вероятнее всего связано со спецификой оптических наблюдений СО: на фоне дневного неба они практически не различимы, что вовсе не значит, что их в это время не может быть фактически.

Дополнительные сгустки ионизации могут образовываться несколькими путями. Один из вероятных связан с глобальной циркуляцией атмосферы и расположением ионосферной “ст. Москва” ($55^\circ N$). На это указывает сходство характеров сезонных и циклических вариаций частоты появления АО и Es , а также АО и серебристых облаков. Они, возможно, свидетельствуют о том, что их образование происходит при близких или общих фоновых (гелиогеофизических) условиях, благоприятных для развития всей этой триады явлений. Одним из таких условий, вероятно, может быть глобальная атмосферная циркуляция, благодаря которой летом в северном полушарии из-за меридионального движения воздушных масс поток воздуха поднимается до высот 70–90 км (а возможно и выше) не только охлаждая мезосферу, но

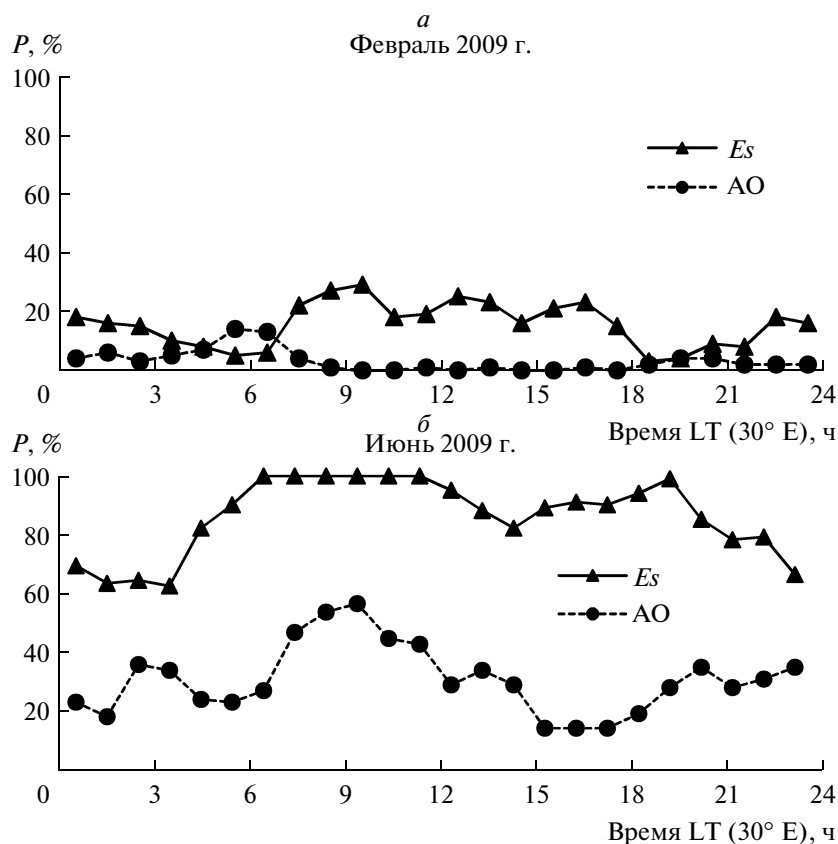


Рис. 7. Суточные вариации P_{AO} и P_{Es} на “ст. Москва” по данным ионозонда “Парус” в феврале и июне 2009 г.

также изменяя состав и плотность атмосферы на высотах верхней атмосферы в течение суток.

Тем не менее, это обстоятельство не дает оснований отождествлять АО с E_s или серебристыми облаками. Поскольку ключевое требование, предъявляемое к механизмам образования АО, состоит в наличии источников ионообразования, дополнительных по отношению к солнечному УФ- и рентгеновскому излучению, способных формировать “автономные” относительно мелкомасштабные сгустки плазмы (вкрапления), плотность которых существенно превышает электронную концентрацию в регулярных слоях ионосферы. Не исключено, что наиболее вероятным “кандидатом” на роль основного вкладчика в столь необычную ионизацию вносят потоки электронов с энергиями 1–10 кэВ.

7. ВЫВОДЫ

В результате анализа большого массива ионограмм вертикального зондирования, полученных на “ст. Москва” за период 1964–2010 гг., обнаружено неизвестное ранее явление существования аномальных отражений – АО необычного типа на

высотах 100–200 км. Они “оторваны” от основного $Ne(h)$ -профиля ионосферы. Продолжительность наблюдаемых аномальных отражений меняется от 15 мин до нескольких часов. В летний период АО наблюдаются чаще и имеют большую продолжительность. Суточный ход появления АО меняется в зависимости от сезона. Связь вероятности появления АО с солнечным циклом требует дальнейшего изучения.

Авторы считают своей приятной обязанностью выразить благодарность В.А. Панченко за предоставленные материалы ионозонда “DPS-4” и участие в обсуждении данной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бронштэн В.А.* Серебристые облака и их наблюдение. М.: Наука, 128 с. 1984.
- *Ромейко В.А., Перцев Н.Н., Далин П.А.* Многолетние наблюдения серебристых облаков в Москве: база данных и статистический анализ // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 5. С. 707–707. 2002.
- *Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.П., Шефтель В.М.* Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. М.: Наука, 117 с. 1975.