

Вариации СДВ сигналов при восходе Солнца в Антарктиде

Р. С. Шубова, А. В. Колосков, В. Г. Безродный,
П. В. Силин, Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: yampol@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 4 января 2001 г.

В работе проведен анализ начальных моментов восходных изменений параметров радиосигналов СДВ диапазона, зарегистрированных на антарктической станции “Фарадей”. Используются результаты длительных круглосуточных измерений фазы и амплитуды на нескольких частотах в диапазоне от 10.2 до 24 кГц. Установлено, что, как и на среднеширотных трассах, момент радиовосхода запаздывает на 30 ÷ 40 мин относительно восхода Солнца на высоте ночной нижней ионосферы, 85 ÷ 90 км, и группируется в окрестности времени восхода Солнца на высоте 35 км над приемным пунктом. Показано, что вариации времени радиовосхода зависят от длины и ориентации трассы относительно терминатора, а также от частоты сигнала и не зависят от изменений общего содержания озона.

В роботі проведено аналіз початкових моментів східних змін параметрів радіосигналів НДХ діапазону, що приймалися на антарктичній станції “Фарадей”. Використовуються результати цілодобових вимірювань фази та амплітуди на декількох частотах у діапазоні від 10.2 до 24 кГц. Встановлено, що, як і на середньоширотних трасах, момент радіосходу затримується на 30 ÷ 40 хв відносно сходу Сонця на висоті нижньої іоносфери, 85 ÷ 90 км, і групується поблизу часу сходу Сонця на висоті 35 км над приймальним пунктом. Показано, що варіації часу радіосходу залежать від довжини та орієнтації траси відносно термінатора, а також від частоти сигналу і не залежать від зміни загального вмісту озону.

1. Введение

Можно считать, что на протяженных трассах распространение сверхдлинных радиоволн происходит в волноводе, образованном поверхностью Земли и нижней границей ионосферы. Многие годы в Радиоастрономическом институте НАН Украины исследовались статистические свойства и аномалии поведения СДВ сигналов в диапазоне частот 10 ÷ 20 кГц на среднеширотных трассах северного полушария разной ориентации и протяженности. Полученные результаты изложены в монографии и статьях [см., например, 1-3].

В 1996 г. Украине была передана Британская антарктическая станция “Фарадей”. По просьбе Украинского антарктического центра британские коллеги передали авторам настоящей статьи полученные за несколько лет круглосуточных наблюдений записи временных вариаций амплитуды и фазы сигналов СДВ диапазона на разных трассах. Большой объем экспериментальных данных представляет интерес, поскольку позволяет исследовать поведение СДВ сигналов на протяженных трассах южного полушария и наряду с этим решать задачи радиодиагностики нижней ионосферы

и прогнозирования условий распространения радиоволн этого диапазона.

Одна из таких задач состоит в уточнении зависимости времени радиовосхода от зенитного угла Солнца. Предпосылкой для постановки этой задачи явились ранее выполненные работы [4, 5]. В работе [4] определялись моменты радиовосхода по сигналам, распространявшимся с запада на восток на двух среднеширотных трассах северного полушария протяженностью ~7000 км и ~2600 км на частотах 17.8 кГц (станция NAA) и 16 кГц (станция GBR) соответственно.

Для определения времени радиовосхода использовались суточные изменения фазы сигнала. Радиовосходом называется момент, когда меняется знак у производной фазы сигнала при переходе от ночных условий к дневным. На обеих трассах радиовосход наступал раньше на приемном конце трассы. Моменты радиовосхода сгруппировались в окрестности времени восхода Солнца над приемником на высоте озоносферы ~35 км, $\chi = 96^\circ$ (см. рис. 1), запаздывая относительно времени восхода Солнца на высоте ночной нижней ионосферы ($85 \div 90$ км, $\chi = 100^\circ$) на 30 ÷ 40 мин. (Восходом Солнца считается момент времени, когда луч от верхнего края солнечного диска попадает на соответствующую высоту над приемным пунктом, рис. 2, линия 1).

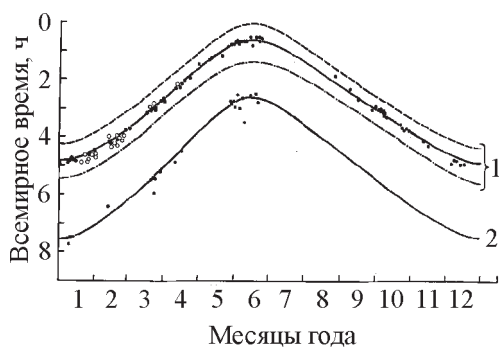


Рис. 1. Сезонные изменения времени радиовосхода на среднеширотных трассах:
 ○ — частота 17.8 кГц, ● — частота 16.0 кГц;
 1 — время восхода Солнца над приемным пунктом;
 2 — время восхода Солнца на высоте 35 км над передатчиком GBR (— · — $h = 0$ км; — $h = 35$ км; - - - $h = 90$ км)

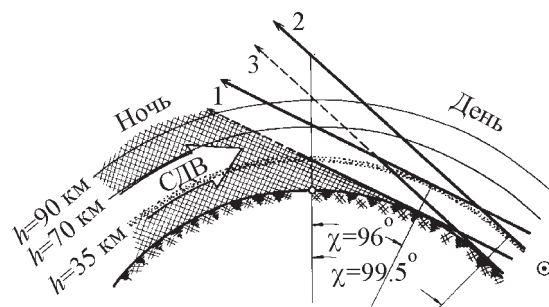


Рис. 2. Геометрия восходных лучей Солнца

Использованный в работе [4] экспериментальный материал был ограничен количеством, а также по сезонам и ориентации трасс, поэтому результаты измерений на станции “Фарадей” позволили расширить начатые ранее исследования, давая возможность обобщить их на область высоких широт.

Целью данной работы является:

- уточнение зависимости времени радиовосхода от зенитного угла Солнца;
- исследование влияния частоты сигнала, длины и ориентации трассы на время радиовосхода;
- определение взаимосвязи между вариациями общего содержания озона и временем радиовосхода.

Наблюдения за общим содержанием озона предусматривались регламентом работ, проводимых на станции “Фарадей”.

2. Исходные данные

На станции “Фарадей” (65.5° ю. ш.; 64.3° з. д.) измерения выполнялись в диапазоне частот 10.2 ÷ 24 кГц на трассах разной протяженности и ориентации. Схема расположения передающих станций и приемного пункта приведена на рис. 3. Две передающие станции относились к глобальной радионавигационной системе “Омега” (частоты 10.2 ÷ 13.6 кГц). Одна располагалась на Гавайях (21.4° с. ш.; 157.8° з. д.; протяженность трассы ~12.3 тыс. км), другая в Аргентине (43.1° ю. ш.; 65.2° з. д.; протяженность трассы ~2.5 тыс. км). Передающая станция NAA (частота 24 кГц) находится в Север-

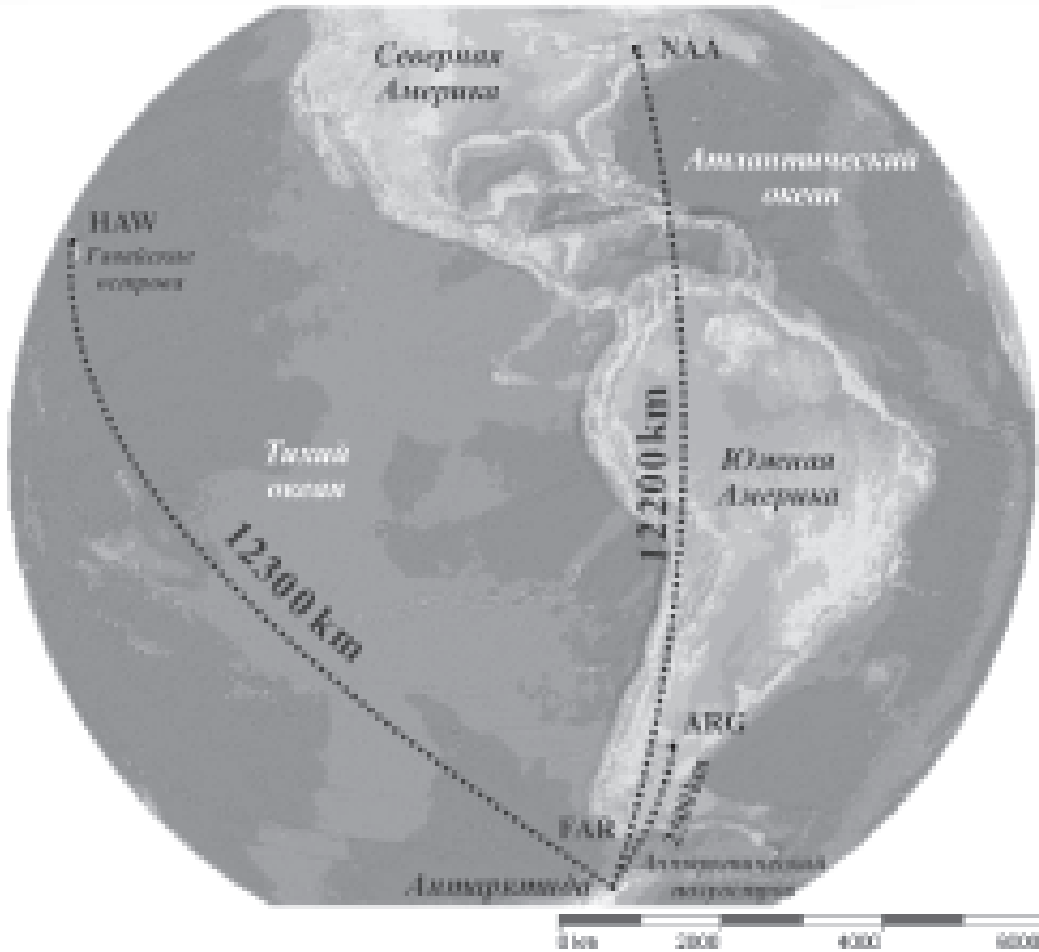


Рис. 3. Схема расположения передающих станций и приемного пункта

ной Америке (44.7° с. ш.; 67.3° з. д.; протяженность трассы ~ 12.2 тыс. км). Для обозначения передающих станций навигационной системы “Омега” и приемного пункта приняты следующие аббревиатуры: станция на Гавайях – HAW, в Аргентине – ARG, приемный пункт – FAR.

В соответствии с расчетом параметров сигнала для однородного по высоте волновода на короткой трассе (ARG – FAR) на всех частотах навигационной станции “Омега” ($10.2 \div 13.6$ кГц) в дневных условиях поле носит одномодовый характер, а в ночных – двухмодовый. На протяженной трассе (HAW – FAR) днем и ночью распространяется одна мода. На частоте 24 кГц (станция NAA) днем поле носит одномодовый характер с ведущей низшей модой, а ночью – двухмодовый, при-

чем ведущая роль переходит к модам более высоких номеров – 2 и 3.

На всех частотах проводились измерения суточного хода амплитуды и фазы принимаемого сигнала. Наблюдения охватывали следующие периоды: в 1990 году – с 5.04 по 31.12; в 1991 году – с 1.01 по 1.05; в 1994 году – с 1.01 по 31.12. Данные за каждые сутки представлены в виде двух 10-часовых файлов. Запись сигналов навигационной станции “Омега” осуществлялась раз в 10 с, станции NAA – через 1 с. В данных 1990 и 1991 годов отсутствуют регистрации за 4 дневных часа (с 9:43 до 13:43 LT), в данных 1994 года – за 4 ночных часа (с 21:43 до 1:43 LT).

Предварительный анализ полученных экспериментальных результатов показал, что

в записях фазы наряду с регулярными суточными изменениями, обусловленными увеличением высоты волноводного канала связи при переходе ото дня к ночи, присутствует дополнительный линейный ход за счет расстройки частоты опорного генератора приемного пункта относительно частот передающих станций.

Обращает на себя внимание и характер суточных записей амплитуды на меридиональных трассах: на восходе и заходе Солнца регулярно присутствуют минимумы сигнала, которые на всех частотах появляются практически одновременно. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что их возникновение не связано с интерференционной структурой многомодового волноводного поля. Глубина минимума изменяется в зависимости от частоты и времени года.

Восходные эффекты появления минимумов амплитуды сигнала на одной частоте (24 кГц) анализируются также в работе [6], однако рассмотрение проводится с позиций интерференционной структуры многомодового поля.

Аналогичное поведение амплитуды отмечено и в работах [7, 8]. В [8] появление минимума объясняется возникновением сигнала, отраженного от движущегося терминатора. Как полагают авторы, в зоне терминатора основная волна компенсируется отраженной, вследствие чего поле изменяется с расстоянием как $X^{-3/2}$ (вместо $X^{-1/2}$ в случае регулярного волновода). Тезисный характер работы и отсутствие анализа изменений фазы приводят к необходимости более глубокого теоретического исследования поведения амплитуды и фазы на меридиональных трассах в переходные периоды.

3. Методика обработки результатов измерений

Обработка данных измерений проводилась численно. Для определения моментов радиовосхода была разработана специальная программа. Данные регистрации суточного изменения фазы усреднялись на интервале 1 мин с последующим дифференцированием. Моменты, когда значения частоты меняли знак, принимались за начало и конец восходного

и заходного процессов, после чего выделялись соответственно ночной или дневной участки суточной записи. Далее программа предусматривала исключение линейного (аппаратурного) хода фазы. Устранение линейного набега фазы в реализациях 1990 и 1991 годов, где отсутствуют непрерывные дневные данные, производилось по ночным записям. Такой метод не совсем корректен, поскольку известно, что в течение ночи высота волновода не сохраняется на постоянном уровне, а приподнимается к утру на 3÷5 км [9] и ночью распространяется не одна, а две моды. В результате этого значения линейных наклонов фазы сигналов навигационной станции “Омега” изменялись непропорционально частотам. При исключении линейного хода фазы по дневным участкам записи (1994 г.) такая погрешность отсутствует. После устранения линейного набега фазы воспроизводился реальный суточный ход фазы и амплитуды (рис. 4), выдавались данные о времени радиовосхода и значении линейного наклона фазы на каждый день. Момент радиовосхода $T_{\text{изм}}$ определялся с погрешностью ± 2 мин. Далее (в соответствии с выводами работы [4]) рассчитывалось время восхода Солнца на высоте 35 км над приемным или передающим пунктом. Для этого вычислялся часовой угол Солнца t по формуле

$$\cos t = \frac{\sin h_{\odot} - \sin \varphi \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cos \delta_{\odot}},$$

где φ – широта пункта; δ_{\odot} – склонение Солнца; $h_{\odot} = -57.3\sqrt{2H/(R_{\oplus} + H)}$ – зенитное расстояние; H – высота, на которой определяется восход; R_{\oplus} – радиус Земли. После чего по найденному значению t , в соответствии со стандартным алгоритмом, описанным в [10], рассчитывалось время восхода Солнца T_p на высоте 35 км и вычислялась разность $\Delta T = T_p - T_{\text{изм}}$.

1. Вначале момент радиовосхода определялся для меридионально ориентированных

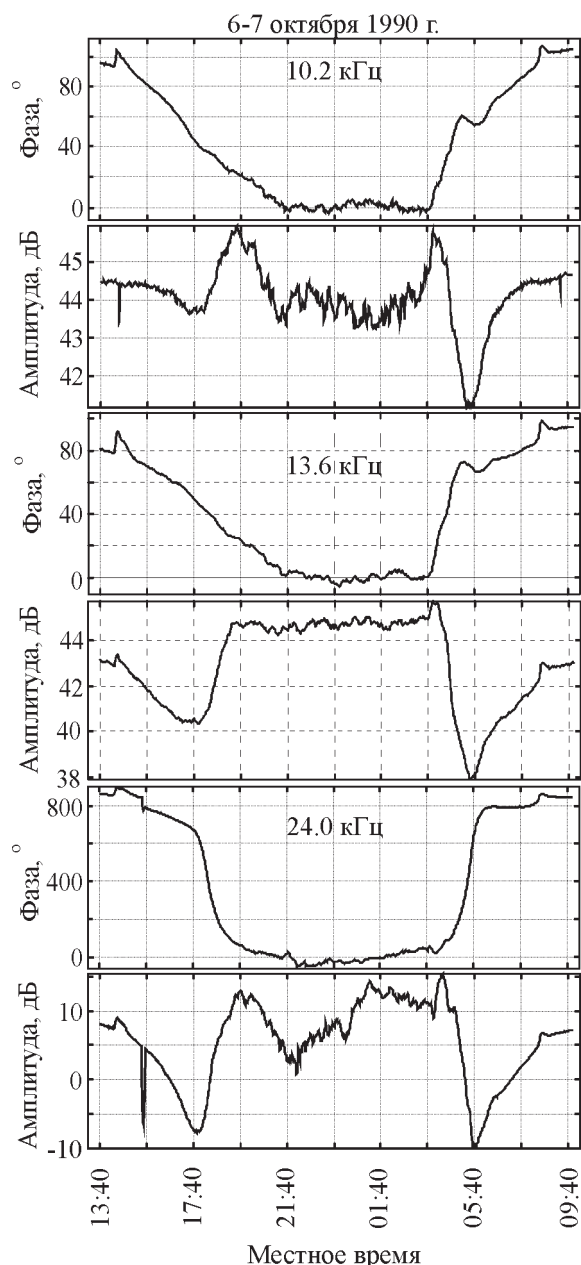


Рис. 4. Суточный ход амплитуды и фазы СДВ сигналов

трасс, причем использовались реализации только за те дни, для которых восход наступал раньше на приемном конце трассы. Объем этих данных ограничен, поскольку в летнее время в южном полушарии с 15 ноября по 15 февраля ночные условия на приемном конце трассы отсутствуют (высота 35 км круглые сутки освещена Солнцем), а в конце осенне-

го, начале весеннего периодов и зимой восход наступает раньше на передающих концах меридиональных трасс. Таким образом, пригодными для определения времени радиовосхода на приемном конце трассы оказались данные за сентябрь-октябрь 1990 года, февраль-март 1991 года и те же периоды в 1994 году. Полученные результаты в дальнейшем использовались для анализа их связи с вариациями общего содержания озона. Моменты радиовосхода определялись на трех частотах (10.2; 12.9; 13.6 кГц) на трассе ARG – FAR и на частоте 24 кГц (трасса NAA – FAR). На рис. 5 показано положение моментов радиовосхода относительно расчетного времени восхода Солнца на высоте 35 км для каждого дня и на всех частотах. В табл. 1 приведены значения разности моментов радиовосхода относительно восхода Солнца на высоте 35 км, усредненные по каждому из выше указанных периодов ΔT_{cp} , и средние значения общего содержания озона O_{cp} (измеряется в единицах Добсона) за эти же периоды:

$$\Delta T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i, \quad O_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i,$$

где ΔT_i – разность между моментами радиовосхода и расчетным временем восхода; O_i – общее содержание озона для каждой реализации; N – количество реализаций, по которым выполнено усреднение.

Оказалось, что моменты радиовосхода на меридиональных трассах ARG – FAR и NAA – FAR отличаются между собой как при приеме сигналов разных частот от одной станции (ARG), так и при приеме сигналов от двух станций (ARG и NAA). Наибольшие отклонения относительно расчетного значения, как следует из табл. 1 и рис. 5, наблюдаются на короткой трассе при приеме сигналов станции ARG навигационной системы “Омега”.

Этот несколько неожиданный результат, как мы полагаем, обусловлен появлением на меридионально ориентированной трассе сигнала, отраженного от терминатора, о чем также свидетельствует возникновение минимумов амплитуды.

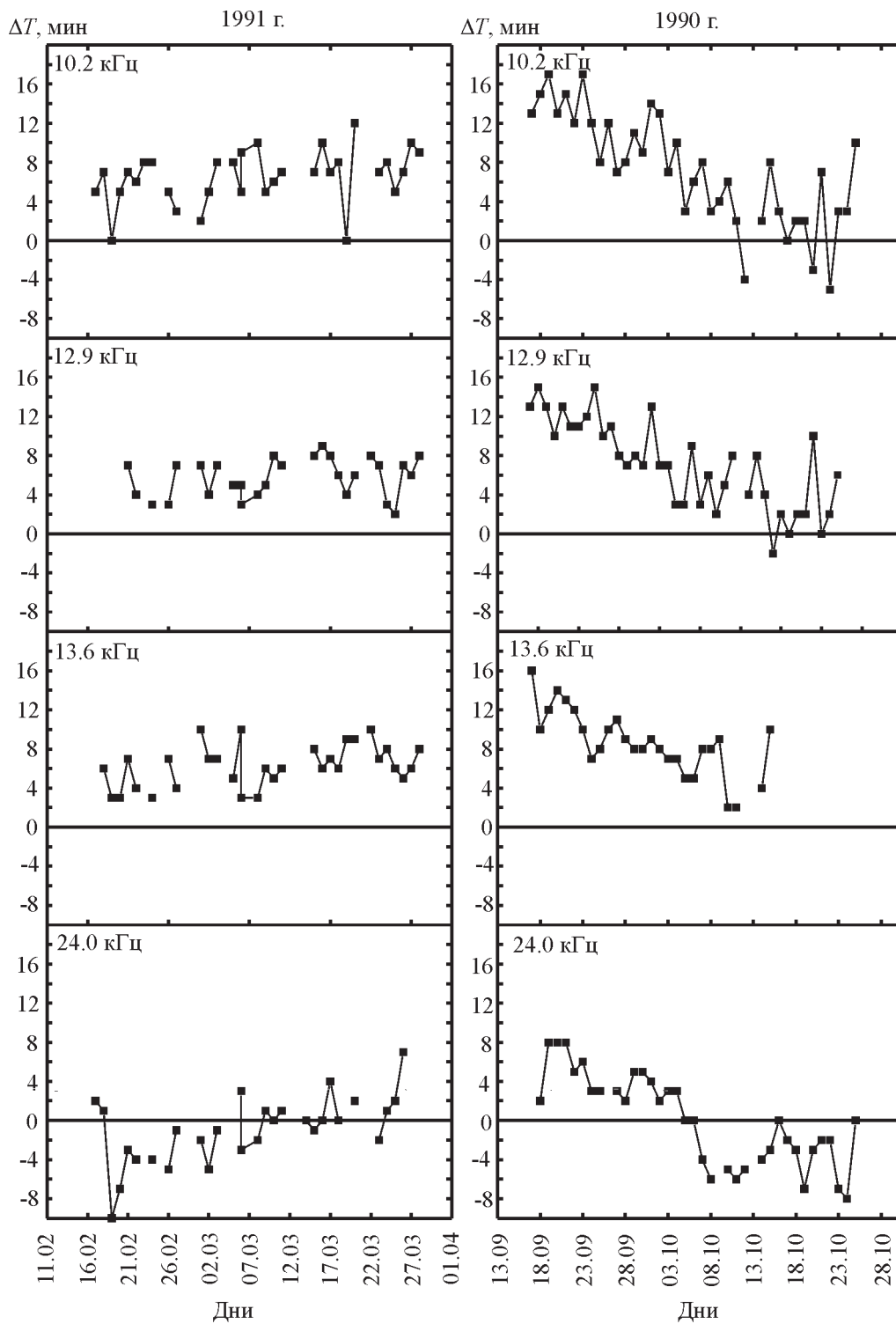


Рис. 5. Вариации времени радиовосхода

Таблица 1. Разность между моментами радиовосхода и расчетным временем восхода Солнца на высоте 35 км на меридиональных трассах ARG – FAR и NAA – FAR

Период измерений	$\Delta T_{\text{ср}}$, мин				$O_{\text{ср}}$, ед. Добсона	N
	“Омега” ARG			NAA		
	10.2 кГц	12.9 кГц	13.6 кГц	24 кГц		
февр. – март 1991 г.	6.5 ± 2.5	5.6 ± 1.9	5.8 ± 2.1	-1 ± 2.7	286	40
сент. – окт. 1990 г.	7.5 ± 3.1	7 ± 2.8	6.7 ± 2.2	0.47 ± 2.6	258	39
март 1994 г.	7.6 ± 2.1	–	5.6 ± 2.6	0.33 ± 2.9	259	20
сент. – окт. 1994 г.	–	–	7.4 ± 2.9	-0.85 ± 2.8	–	16

2. Для проверки этого предположения были выполнены оценки моментов радиовосхода по сигналам расположенной на Гавайях станции NAW навигационной системы “Омега” для тех же весенне-осенних периодов. В табл. 2 приведены средние по каждому циклу измерений значения отклонений моментов радиовосхода относительно восхода Солнца на высоте 35 км.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что на протяженной наклонной трассе HAW – FAR (приемный и передающий пункты разнесены по долготе и широте) моменты радиовосхода группируются в окрестности времени восхода Солнца на высоте 35 км со значительно меньшим отклонением, чем на короткой меридиональной трассе.

С одной стороны, этот факт дает основание полагать, что время радиовосхода существенным образом зависит от взаимного расположения трассы и терминатора. При распространении сигнала вдоль терминатора начало восходного процесса наступает раньше, чем

на наклонной трассе. С другой стороны, это утверждение не бесспорно, так как одновременно изменяется протяженность трассы распространения сигнала, а следовательно, можно предположить, что длина трассы также влияет на момент радиовосхода. Как следует из результатов, приведенных в табл. 1, времена радиовосхода на короткой и длинной меридиональных трассах действительно отличаются. Момент восхода на короткой трассе наступает раньше, чем на длинной, но при этом на длинной трассе распространяется сигнал более высокой частоты (24 кГц). Оснований игнорировать зависимость момента радиовосхода от частоты тоже нет, поскольку как длина трассы, так и частота влияют на параметры сигнала. Длина трассы сказывается на модовом составе сигнала, а частота – на дисперсионных свойствах волновода.

Так, в ночных условиях на короткой (ARG – FAR) и длинной (HAW – FAR) трассах в формировании сигнала у приемника принимает

Таблица 2. Разность между моментами радиовосхода и расчетным временем восхода Солнца на высоте 35 км на трассе HAW – FAR

Дата измер.	$\Delta T_{\text{ср}}$, мин		$O_{\text{ср}}$, ед. Добсона	N
	“Омега” HAW			
	11.8 кГц	13.6 кГц		
сент.– окт. 1990 г.	-1.8 ± 2.2	–	258	13
март 1991 г.	1.25 ± 2.4	–	–	10
март 1994 г.	-0.15 ± 2.1	-2.8 ± 1.9	259	15

участие различное число мод: на короткой трассе – две моды, а на длинной – одна. В диапазоне частот 10.2÷13.6 кГц параметры распространения (фазовая скорость, коэффициенты возбуждения и преобразования) второй моды существенно отличаются от параметров первой, вследствие чего могут отличаться и времена радиовосхода. Аналогичная ситуация возникает при распространении сигналов разных частот на двух меридиональных трассах. С повышением частоты область в ионосфере, ответственная за формирование фазы сигнала, расширяется и смещается по высоте, а также уменьшаются коэффициенты возбуждения, преобразования и фазовая скорость мод [3, 11, 12].

Таким образом, возможно, что время радиовосхода определяется восходом Солнца на высоте 35 км, а его вариации зависят от ориентации трассы относительно терминатора, частоты и модового состава сигнала.

3. С целью уточнения полученных результатов были рассчитаны времена восхода Солнца на высоте 35 км и выполнены оценки моментов радиовосхода на передающем конце меридиональных трасс в те периоды, когда восход здесь наступает раньше, чем на приемном конце. С апреля по август на короткой трассе на частотах навигационной системы “Омега”, 10,2 и 13.6 кГц, радиовосход опережает восход Солнца на высоте 35 км в среднем на 5.9 и 4.7 мин. соответственно. На частоте 12.9 кГц это опережение значительно меньше – 0.6 мин. На длинной трассе и более высокой частоте 24 кГц радиовосход отстает на 3 мин.

4. Результаты выполненных оценок времени радиовосхода на разных трассах и частотах СДВ диапазона в целом не противоречат выводам работы [4]. По-прежнему начальные моменты радиовосхода концентрируются в окрестности времени восхода Солнца на высоте 35 км. Эта высота, как полагают, разделяет озоносферу на две части: нижняя представляет собой динамическую область, где сосредоточена основная масса озона, а верхняя – фотохимическая [13].

Возникает естественный вопрос, имеется ли связь между вариациями общего содержания озона и изменениями времени радиовос-

хода. Наблюдения за вариациями содержания озона проводились на станции “Фарадей” с помощью спектрофотометра Добсона с точностью до 1 %.

Для оценки связи вариаций общего содержания озона с моментом радиовосхода рассчитаны взаимные корреляторы:

$$K = \frac{\langle \Delta T_i \Delta O_i \rangle}{\sigma_{\Delta T} \sigma_{\Delta O}},$$

где ΔT_i – отклонение времени радиовосхода для каждой реализации относительно расчетного времени восхода Солнца на высоте 35 км; ΔO_i – вариации общего содержания озона для каждой реализации относительно среднего за все дни измерений; угловые скобки означают статистическое усреднение по ансамблю N реализаций; $\sigma_{\Delta O}$, $\sigma_{\Delta T}$ – среднеквадратичные отклонения вариаций общего содержания озона и момента радиовосхода соответственно.

Среднее значение общего содержания озона за период сентябрь – октябрь 1990 г. составляло 258 ед. Добсона, среднеквадратичное отклонение в сентябре – 31 ед. Добсона, в октябре – 62.1 ед. Добсона. Коэффициенты корреляции между вариациями озона и отклонением времени радиовосхода относительно расчетного времени восхода Солнца на высоте 35 км на различных трассах оказались следующими:

$$K_{24}^{NAA} = -0.3; \quad K_{10.2}^{ARG} = 0.1; \quad K_{12.9}^{ARG} = 0;$$

$$K_{13.6}^{ARG} = 0.1; \quad K_{11.8}^{HAW} = -0.25.$$

За период февраль – март 1991 г. среднее значение общего содержания озона составило 286 ед. Добсона, среднеквадратичное отклонение в феврале – 19.3 ед. Добсона, в марте – 19.2 ед. Добсона, коэффициенты корреляции –

$$K_{24}^{NAA} = -0.15; \quad K_{10.2}^{ARG} = 0; \quad K_{12.9}^{ARG} = 0;$$

$$K_{13.6}^{ARG} = 0.4; \quad K_{11.8}^{HAW} = 0.1.$$

Среднее значение общего содержания озона за март 1994 составляло 260 ед. Добсона, среднеквадратичное отклонение – 13.9 ед. Добсона, оценки коэффициента корреляции были следующими:

$$K_{24}^{NAA} = -0.1; \quad K_{10.2}^{ARG} = 0.25; \quad K_{13.6}^{HAW} = 0.2.$$

Как видно из полученных оценок, на всех трассах между моментами радиовосхода и вариациями общего содержания озона связь фактически отсутствует. Для иллюстрации этого факта на рис. 6 приведены графики корреляционной зависимости $K(\tau)$.

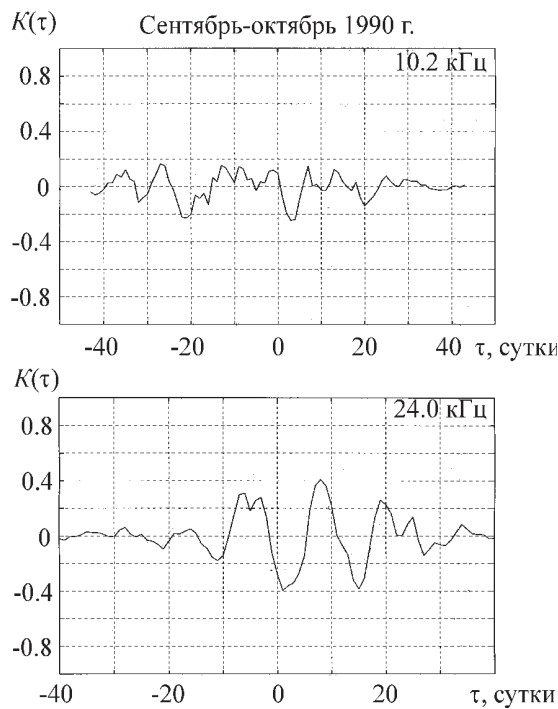


Рис. 6. Взаимные корреляторы вариаций общего содержания озона со временем радиовосхода

4. Анализ результатов обработки

Как показали результаты обработки экспериментальных данных, во всех рассмотренных случаях моменты радиовосхода группируются в окрестности времени восхода Солнца на

высоте 35 км над приемным пунктом. При этом времена радиовосхода отличаются между собой в одном приемном пункте при распространении сигналов одинаковых частот на трассах разной длины и ориентации (ARG – FAR и HAW – FAR). Моменты радиовосхода на двух меридиональных трассах разной длины (ARG – FAR и NAA – FAR) на разных частотах также различны.

Наибольшие отклонения относительно расчетного времени восхода Солнца на высоте 35 км наблюдаются на короткой меридиональной трассе. В исследуемые весенне-осенние периоды максимальное опережение расчетного времени восхода Солнца (15÷17 мин) наблюдается в дни равноденствия (рис. 5), когда скорость движения терминатора максимальна и равна скорости вращения Земли вокруг своей оси. Та же тенденция изменения моментов радиовосхода сохраняется и на протяженной меридиональной трассе NAA – FAR, однако максимальные отклонения относительно расчетного значения оказываются меньше: ±8 мин. Они группируются таким образом, что средние значения, как следует из табл. 1, в разных циклах измерений изменяются от 0.47 до –1 мин, в то время как на частотах станции “Омега” ARG (10.2÷13.6 кГц) отклонения составляют от 5.5 до 7.6 мин.

В те же весенне-осенние периоды на наклонной протяженной трассе HAW – FAR, расположенной под углом к терминатору, на тех же частотах 10.2÷13.6 кГц моменты радиовосхода отличаются от расчетного значения значительно меньше, чем на короткой меридиональной трассе ARG – FAR.

На передающих концах меридиональных трасс отклонения моментов радиовосхода относительно расчетного значения восхода на высоте 35 км, как и на приемном конце, зависят от длины трассы и частоты сигнала.

Несмотря на то, что на приемном конце на некоторых трассах и частотах время радиовосхода достаточно хорошо согласуется с временем восхода Солнца на высоте 35 км, связи между вариациями моментов радиовосхода и общим содержанием озона не обнаружено.

5. Заключение

Результаты выполненного анализа подтвердили справедливость выводов работы [4]. Моменты радиовосходов для сигналов различных частот, распространяющихся на трассах различной ориентации и протяженности, также группируются в окрестности времени восхода Солнца на высоте 35 км.

Наряду с этим обнаружено, что времена радиовосхода зависят также от частоты, молекулярного состава принятого сигнала и ориентации трассы.

Наибольшие отклонения относительно расчетного значения возникают на меридионально ориентированных трассах в условиях, когда терминатор и трасса параллельны, причем в этой ситуации изменения касаются не только фазы, но и амплитуды сигнала (восходные и заходные минимумы).

На низких частотах, $10.2 \div 13.6$ кГц, на короткой меридиональной трассе моменты радиовосхода опережают восход Солнца на высоте 35 км в среднем на $5 \div 6$ мин, в то время как на протяженной наклонной трассе и на тех же частотах опережение составляет всего $1 \div 2$ мин.

На длинной меридиональной трассе и на высокой частоте, 24 кГц, моменты радиовосхода отстают.

Не обнаружена связь между вариациями моментов радиовосхода и изменениями общего содержания озона ни на одной из исследуемых частот и трасс распространения сигнала.

Таким образом, на основании полученных результатов можно утверждать, что начало восходных изменений в нижней ионосфере совпадает с восходом Солнца над приемным или передающим пунктом на высоте 35 км (см. рис. 2, линия 1) и соответствует зенитному углу Солнца, равному 96° .

Существенно, что приход солнечного излучения, как неэкранированного озоносферой [9, 14], так и прошедшего через нее на высоту ночной нижней ионосферы, не оказывает влияния на фазу СДВ сигнала (см. рис. 2, линии 2 и 3 соответственно). Однако причину, по которой переход от ночных условий к дневным в нижней ионосфе-

ре (радиовосход) запаздывает относительно прихода солнечного излучения на ионосферные высоты, убедительно объяснить так и не удалось [15, 16].

По-видимому, в поведении нижней ионосферы в сумеречный период, являющийся переходным от ночных к дневным условиям, происходит множество еще не до конца изученных явлений. Возможно, как предполагается в работах [4, 5, 17], приход солнечного излучения на высоту озоносферы является стимулирующим фактором начала восходных изменений не только в D-области ионосферы, но и в E- и F-областях.

В заключение следует отметить, что имевшиеся в нашем распоряжении данные не позволили однозначно выяснить зависимость момента радиовосхода от частоты сигнала, длины и ориентации трассы, поскольку одновременно изменялись два параметра: либо длина трассы и частота сигнала, либо длина и ориентация трассы. Тем не менее они дали возможность показать, что такие зависимости присутствуют.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность заместителю директора Украинского антарктического центра Г. П. Милиневскому за полезные дискуссии и участие в постановке задачи, а также коллегам из Британского антарктического центра за предоставленные массивы данных СДВ наблюдений на станции "Фарадей".

Литература

1. В. Г. Безродный, П. В. Блюх, Р. С. Шубова, Ю. М. Ямпольский. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля-ионосфера. Москва, Наука, 1984, 142 с.
2. Р. С. Шубова. Изв. вузов. Радиофизика. 1985, **28**, №6, с. 694-702.
3. В. Г. Безродный, Р. С. Шубова, Е. Н. Фурман. В сб.: Низкочастотный волновод "Земля-ионосфера". Алма-Ата, Изд. Гылым, 1991, с. 103-108.
4. В. П. Васильев, Р. С. Шубова. В сб.: Динамика ионосферы, часть 2, Алма-Ата, Изд. Гылым, 1991, с. 16.
5. В. П. Васильев, Р. С. Шубова. Препринт РИАН Украины. Харьков, 1990, №46, 17 с.
6. Clilverd Mark A., Neil R. Thomson, and Craig J. Rodger. Radio Science. 1999, **34**, No. 4, pp. 939-948.

7. П. П. Лапин, В. В. Новиков. В сб.: Распространение радиоволн километрового диапазона. Апатиты, ПГИ, 1987, с. 61.
8. П. П. Лапин, А. Г. Таланов. В сб.: Низкочастотный волновод "Земля – ионосфера". Алма-Ата, Изд. Гылым, 1991, с. 40-41.
9. А. Б. Орлов, Г. В. Азарнин. Проблемы дифракции и распространения волн. Ленинград, Изд. ЛГУ, вып. 10, 1970, с. 3.
10. Д. В. Загребин. Введение в астрометрию. Москва, Ленинград, Изд. Наука, 1966, 478 с.
11. С. Т. Рыбачек. Изв. вузов. Радиофизика. 1972, **15**, №9, с. 1300-1303.
12. А. Д. Авдеев, А. Б. Виленский. В сб.: Проблемы дифракции и распространения волн. Ленинград, Изд. ЛГУ, 1990, вып. 23, с. 85-101.
13. А. А. Кривоуццкий, А. А. Куминов, А. И. Репнев. Геомагнетизм и аэрономия. 1999, **39**, №3, с. 3.
14. В. М. Сомников. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата, Изд. Наука, 1983, 191 с.
15. Дж. К. Харгривс. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1982, 351 с.
16. А. Н. Горбунов, А. К. Князев, И. О. Неелов, С. В. Пахомов. В сб.: Физика верхней атмосферы. Москва, Гидрометеоиздат, вып. 159, 1985, с. 15.
17. В. П. Абрамчук, В. Н. Ораевский и др. В сб. МФТИ: Распространение и дифракция волн. Москва, 1988, с. 35.

Sunrise Variations of VLF Radio Signals in Antarctica

**R. S. Shubova, A. V. Koloskov,
V. G. Bezrodny, P. V. Silin,
and Yu. M. Yampolski**

Sunrise variations in parameters of the VLF radio signals received at the Antarctic station "Faraday" are studied. Data of round-the-clock phase and amplitude measurements at several frequencies between 10.2 and 24 kHz obtained over several years are analyzed. It has been found that the "radio sunrise" moments are 30 to 40 min delayed with respect to the actual sunrise at the night ionosphere heights ($80 \div 90$ km), similar to the mid-latitude paths, and are close to the sunrise at the height of 35 km above the receiving site. It is shown that the variations of the "radio sunrise" time-moments depend on the path length, orientation of the path relatively to the solar terminator, and frequencies of the signal while they are independent of the total contents of ozone variation.