

УДК 621.371.25

ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СУТОЧНОГО ХОДА ТМ- И ТЕ-КОМПОНЕНТ СДВ ПОЛЕЙ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Г. Ф. Ременец, В. И. Леонов

Проведена физическая интерпретация результатов суточных измерений ТМ- и ТЕ-компонент электромагнитного поля ($f=18,6$ кГц), распространяющегося по летней трассе западное побережье США (Сиэтл) — Камчатка. Показано, что измерения ТЕ-компонент в дальней зоне дают дополнительную (по отношению к измерениям ТМ-компоненты) информацию о свойствах волноводного канала Земля—ионосфера и процессах, происходящих с электромагнитными полями в переходных областях типа ночь—день и день—ночь.

В работах [1, 2] нами была доказана возможность регистрации ТЕ-компоненты (H_θ) поля СДВ на земле в дальней зоне (Камчатка) от станции NLK (Сиэтл, $f=18,6$ кГц), излучающей вертикально-поляризованное электромагнитное поле (ТМ-компоненты). Положительный результат эксперимента, описанного в [2], является новым проявлением существенного влияния магнитного поля Земли на процессы распространения СДВ в дальней зоне ночью.

В настоящей работе мы покажем, что измерения H_θ -компоненты электромагнитного поля в дальней зоне являются дополнительным источником (по отношению к измерениям H_φ) информации о нижних слоях ионосферы и процессах, происходящих с нормальными волнами в переходных областях типа день—ночь и ночь—день.

Основой нижеследующего обсуждения будут результаты измерения амплитуды и фазы сигналов, принимавшихся на две скрещенные рамки в течение трех суток 19—22.VII.71 г. Рамки были установлены так, чтобы первая рамка в основном принимала H_φ -компоненту. Вторая рамка регистрировала сумму компонент $H_z = H_\varphi \sin \alpha + H_\theta$, где $\alpha = \pm (0-3)^\circ$. Точное значение угла отклонения α первой рамки от плоскости, определенной E_r - и E_θ -компонентами электромагнитного поля в окрестности приемных рамок, в условиях эксперимента было неизвестным, но фиксированным.

Составляющая H_θ определяется влиянием местных предметов в окрестности приемного устройства, атмосферным шумом и влиянием анизотропных свойств ионосферы, обусловленных магнитным полем Земли.

Влияние местных предметов не зависит от времени суток, поэтому в обсуждаемом эксперименте по суточным измерениям поля оно приведет к некоторой систематической погрешности. Поскольку нас будут интересовать только относительные изменения полей, принимаемых в течение суток, то это влияние будем считать пренебрежимым.

Узкополосность усилителя сигнала H_z ($\Delta f \approx 1$ Гц) обеспечила значение отношения сигнал/шум $0(10^2)$. В этом мы убедились в процессе измерения 21.VII.71 г. с 4,25 до 4,75 часа (по местному декретному времени в пункте регистрации), когда станция NLK не излучала сигнал. Для канала усиления, регистрировавшего компоненту H_φ , отношение сигнал/шум было равно десяти.

Если компонента $|H_\theta| \ll |H_\varphi \sin \alpha|$, то сигнал, регистрируемый во второй рамке, должен быть пропорционален сигналу, принимаемому первой рамкой, с точностью до шумовых помех в первой рамке и постоянства угла $\alpha = \alpha(t)$ в течение суток. Условие постоянства этого угла может нарушаться рефракцией сигнала при прохождении области день—ночь и ночь—день. Поэтому нарушение постоянства отношения $P(t) = |H_\varphi/H_\theta|$

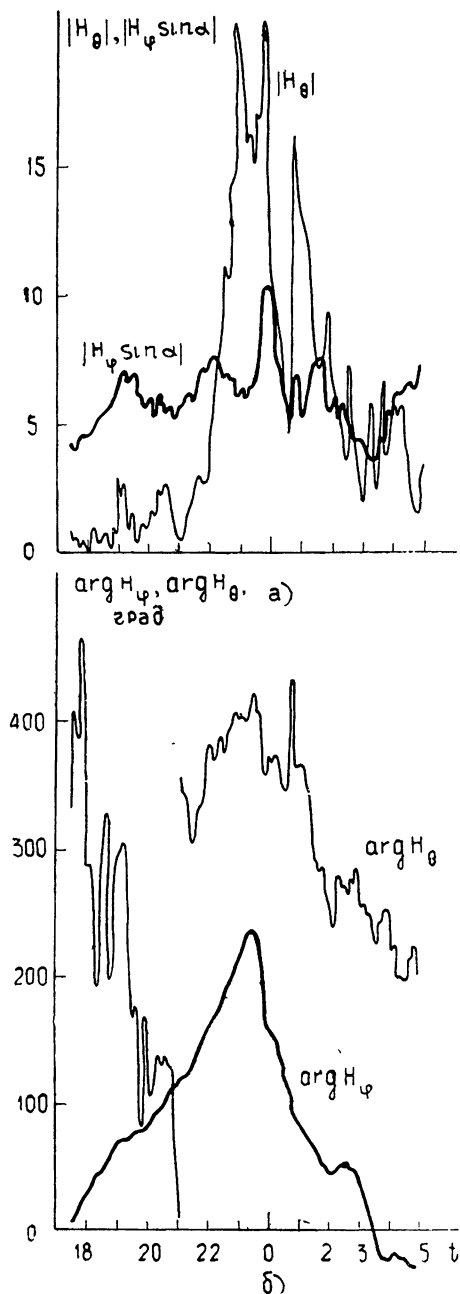


Рис. 1. Модули и аргументы $H_\varphi \sin \alpha$ - и H_θ -компонент как функции местного декретного времени (Камчатка) 19—20 июля 1971 г.

как функции времени суток, вообще говоря, не является однозначным признаком того, что во вторую рамку приходит H_0 -компонента. Однако зависимость отношения H_φ/H_2 от времени суток, приведенная в [2], качественно противоречит зависимости этого отношения, которая может быть порождена влиянием рефракции сигнала. Поэтому при дальнейшем обсуждении результатов наших измерений [2] будем считать, что зависимость угла прихода сигнала от времени суток является малым эффектом по сравнению с влиянием H_0 -компоненты, порожденной магнитоактивной ионосферой.

Хотя в условиях нашего эксперимента калибровку по каналу усиления сигнала со второй рамки выполнить не удалось (угол α тоже неизвестен), тем не менее оказалось возможным выделить суточную зависимость амплитуды и фазы компоненты H_0 (в относительных единицах) из суточных записей амплитуд и фаз H_φ и H_2 -сигналов. Соответствующие результаты для трех суток 19—20, 20—21, 21—22.VII.71 приведены на рис. 1—3 соответственно. По оси абсцисс отложено местное декретное время, а по оси ординат—модуль (рис. 1а—3а) и аргумент (рис. 1б—3б) основной компоненты $H_\varphi \sin \alpha$ (ТМ-компонента) и компоненты H_0 (ТЕ-компонента), появление которой обязано влиянию магнитного поля Земли. Амплитуды обеих величин $H_\varphi \sin \alpha$ и H_0 приведены в одних и тех же условных единицах.

Результаты для компоненты H_0 содержат три вида погрешностей: погрешность измерения амплитуды H_φ (10%), систематическую погрешность, вносимую при обработке результатов предположением, что перед заходом в пункте излучения (17 часов) компонента H_0 в пункте регистрации равна нулю, и погрешность, связанную с вышеупомянутым допущением $\frac{d\alpha}{dt} = 0$.

Движение захода от источника к приемнику (относительно высоты $h=90$ км над Землей) длится 5,5 часов от 17 до 22,5 часов. Чисто ночное состояние нижних слоев ионосферы по трассе имеет длительность 1,5 часа. В интервале времени от 0 до 5 часов от источника к приемнику двигался восход. Протяженность трассы приблизительно равна 5,5 тыс. км, поэтому одному часу времени на заходе соответствует 1 тыс. км смещения переходной области ночь—день по трассе и одному часу на восходе соответствует 1,1 тыс. км смещения области день—ночь по трассе.

Обсудим суточный ход амплитуды и фазы основной компоненты H_φ . Основным носителем сигнала во все моменты суток в окрестности приемника является ТМ₀-нормальная волна, модулируемая ТМ₁-нормальной волной. Зависимости компоненты H_φ от времени на восходе и заходе в основных чертах симметричны (рис. 1—3), причем первому и второму минимуму на заходе и предпоследнему и последнему минимуму на восходе соответствует путь линии терминатора по трассе в 3,5 тыс. км. Это расстояние между интерференционными минимумами D не поддается объяснению, если предполагать преобразование ТМ₁- или ТМ₀-нормальных волн в переходной области [3] в ТМ₀- и ТМ₁-нормальные волны соответственно. При таком механизме образования федингов в приемнике интерференционное расстояние D должно равняться $(2,1 \pm 0,1)$ тыс. км на заходе и $(1 \pm 0,1)$ тыс. км на восходе. Эти значения вычисляются по формуле $D = \lambda(|c/c_\phi^i - c/c_\phi^j|)^{-1}$ [3]. На рассматриваемой частоте длина волны $\lambda = 16$ км. Теоретические значения отношений скорости света c к фазовой скорости i -й или j -й нормальных волн c_ϕ^i для дневной и ночной моделей [4, 5] приведены на рис. 4,

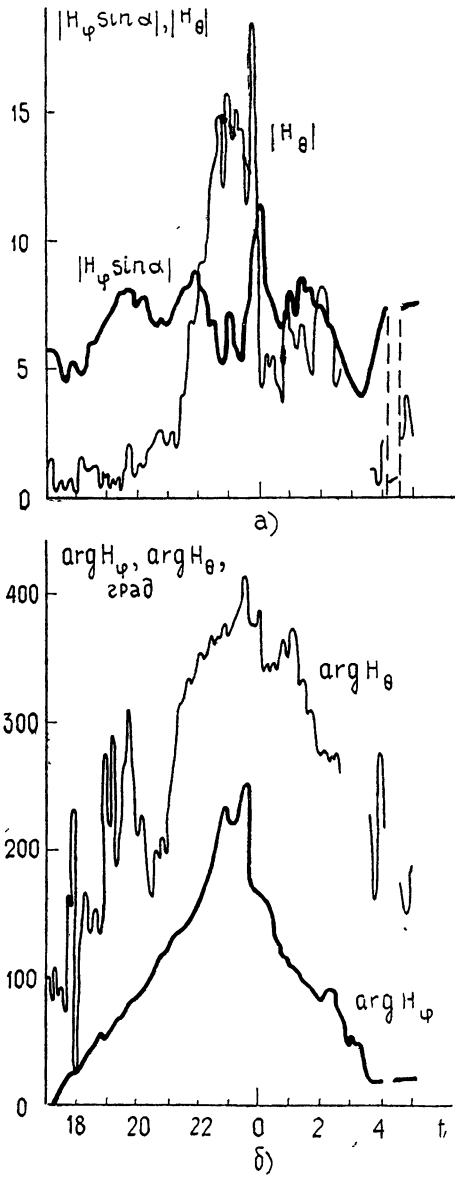


Рис. 2.

Рис. 2. Модули и аргументы $H_\varphi \sin \alpha$ - и H_θ -компонент как функции местного декретного времени 20—21 июля 1971 г.

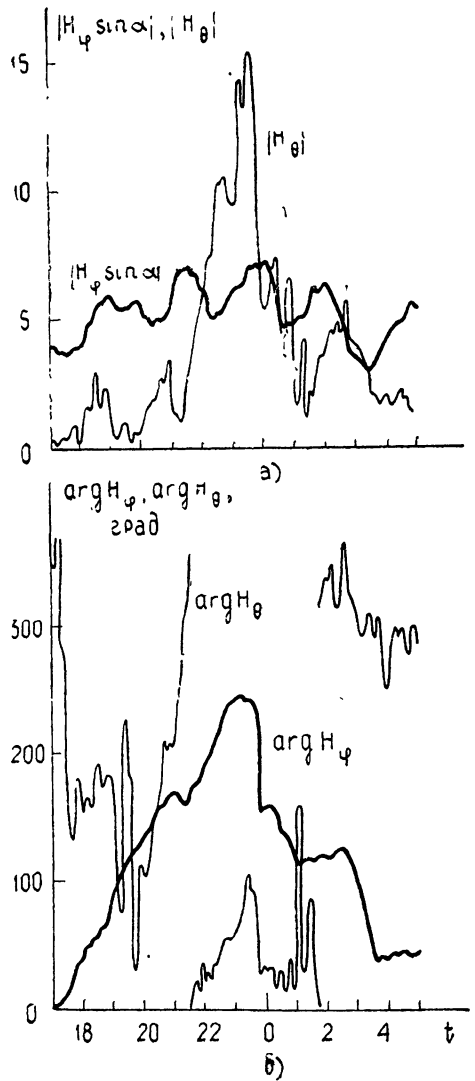


Рис. 3.

Рис. 3. Модули и аргументы $H_\varphi \sin \alpha$ - и H_θ -компонент как функции местного декретного времени 21—22 июля 1971 г.

В то же время экспериментальное значение $D = 3,5$ тыс. км легко объясняется, если допустить, что в приемник приходят TM_0 - и TM_1 -нормальные волны в основном без преобразования одной в другую. В этом случае фединги в приемнике должны регистрироваться из-за разности разностей фазовых скоростей TM_0 - и TM_1 -нормальных волн в дневном и ночном участках волновода;

$$\Delta = \left[\left(\frac{c}{c_{\Phi}} \right)_{TM_1}^n - \left(\frac{c}{c_{\Phi}} \right)_{TM_1}^d \right] - \left[\left(\frac{c}{c_{\Phi}} \right)_{TM_0}^n - \left(\frac{c}{c_{\Phi}} \right)_{TM_0}^d \right] =$$

$$= 0,007 - 0,0025 = 0,0045.$$

Этой разности соответствует интерференционное расстояние $D = 3,5$ тыс. км.

Заметим, что при увеличении эффективной ширины ночного волновода на 5 км разность Δ увеличится на одну тысячную и расстояние D уменьшится соответственно до 2,9 тыс. км. К такому же уменьшению D приведет уменьшение эффективной высоты дневного волновода на 2—3 км.

Третий минимум на заходе, совпадающий во времени с прохождением переходной области зоны приемника, по всей вероятности, связан с уменьшением коэффициента возбуждения TM_0 -нормальной волны. Для наших дневной и ночной моделей на обсуждаемой частоте это уменьшение составляет 20%. Усредненное по трем суткам уменьшение сигнала H_{Φ} в интервале времени от 21,5 до 22,5 часа составляет 25%. Относительно большое увеличение компоненты H_{Φ} в интервал времени, приходящийся на восход в зоне источника 19—20.VII и 20—21.VII (рис. 1 а, 2 а), по всей вероятности, связано с одновременным увеличением сигнала за счет роста коэффициента возбуждения TM_0 -нормальной волны и синфазным сложением TM_0 - и TM_1 -нормальных волн.

Большую глубину последнего минимума на восходе, чем первого минимума на заходе, можно объяснить тем, что во втором случае TM_1 -нормальная волна проходит больший участок ночного пути, чем в первом (примерно на 1 тыс. км). В первом случае глубина модуляции составляет 20%, а во втором — 30%. Разности в 10% соответствует изменение разностного затухания между TM_1 - и TM_0 -нормальными волнами в дневном и ночном волноводах на 0,8 дБ/тыс. км. Если затухание TM_1 -нормальной волны в дневном волноводе равно 4 дБ/тыс. км [5], то из приведенных рассуждений следует, что TM_1 -нормальная волна распространяется с востока на запад в ночном волноводе с затуханием 3,2 дБ/тыс. км (при условии, что TM_0 -нормальная волна распространяется в дневной и ночной частях волновода с одинаковым затуханием). Но средний уровень сигнала по мере вытеснения дневного участка трассы ночным возрастает на 30%, следовательно, разностное затухание TM_0 -нормальной волны на дневном и ночном участках трассы составляет 0,4 дБ/тыс. км и, следовательно, затухание TM_0 -нормальной волны в ночном волноводе равно 1,1 дБ/тыс. км, если затухание этой волны днем при распространении с востока на запад составляет 1,5 дБ/тыс. км [4]. В соответствии с этими оценками затухания TM_0 -нормальной волны получается более точное значение затухания для TM_1 -нормальной волны, равное 2,8 дБ/тыс. км. Отметим, что для нашей ночной модели волновода с шириной однородной полости $h = 85$ км и слоистой моделью электрических свойств земли [4, 5] затухание этой нормальной волны при распространении ее с востока на запад равно 3,5 дБ/тыс. км.

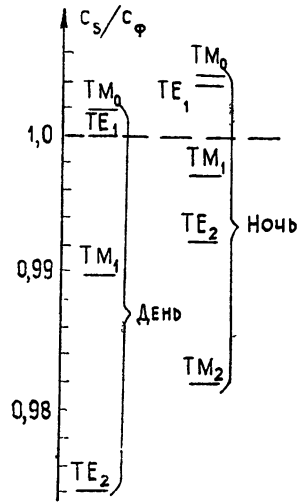


Рис. 4. Значения отношения скорости света c к фазовой скорости нормальных волн c_{Φ}^s для дневной и ночной моделей приземного волновода ($f = 18,6$ кгц).

Перейдем к обсуждению результатов для вторичной компоненты H_0 . Наиболее легко поддается интерпретации поведение компоненты H_0 в пункте регистрации как функции времени (положения переходной области на трассе) во время движения захода. В этот интервал времени основными носителями компоненты H_0 на дневной части трассы являются квази- TE_m -нормальные волны. Из рис. 1 и особенно рис. 2 видно, что в начальный период захода имеет место интерференция двух волн, приходящих в приемник, с периодом интерференции $D = 2 - 2,5$ тыс. км. Такой период интерференции можно объяснить приходом двух дневных TE_1 -нормальных волн, имеющих разное происхождение. Одна волна порождена TM_0 - и TE_1 -нормальными волнами, другая — TM_1 -нормальной волной (преобразование нормальных волн в переходной области). Теоретическое значение D для такого механизма формирования H_0 в приемнике равно $D = 16 \text{ км}/0,007 = 2,3$ тыс. км (см. рис. 4). Отрицательный наклон усредняющей прямой по значениям приращения фазы компоненты H_0 с 17,5 до 20 часов на рис. 1 б и рис. 3 б указывает на то, что в случаях, соответствующих этим рисункам, механизм преобразования TM_1 -нормальной волны в TE_1 -дневную нормальную волну, является определяющим по сравнению с преобразованием ночных TM_0 - и TE_1 -волн в дневную TE_1 -нормальную волну.

По мере движения границы ночь — день по трассе механизм формирования H_0 -компоненты в зоне приемника становится иным, а именно: ему соответствует резкое возрастание амплитуды и в три-четыре раза более быстрое (положительное!) приращение фазы компоненты H_0 по сравнению с приращением фазы компоненты H_φ (см. рис. 1 б для $t = 21,3 - 22,5$ часа, рис. 2 б для $t = 20,5 - 21,3$ и рис. 3 б для $t = 20 - 21,5$). Как видно из рис. 4, переход с ночного «уровня» значения c/c_ϕ для TE_2 -нормальной волны на дневной «уровень» той же самой волны в несколько раз больше аналогичного перехода для TE_1 (TM_0)-нормальной волны. Поэтому в вышеуказанные интервалы времени механизм перехода ночной TE_2 в дневную TE_2 -нормальную волну является определяющим.

Из скорости нарастания амплитуды H_0 в обсуждаемые интервалы времени получается оценка: разностное затухание TE_2 -нормальной волны в дневном и ночном волноводах ≈ 7 дБ/тыс. км. Если затухание TE_2 -нормальной волны в ночном волноводе равно $0,8$ дБ/тыс. км (наша модель волновода [4]), то соответственно в дневном волноводе коэффициент затухания TE_2 -нормальной волны ≈ 8 дБ/тыс. км.

В двух из трех случаев суточной регистрации сигналов, а именно 20 и 21.VII (рис. 2 б, 3 б), крутое нарастание фазы компоненты H_0 сменяется более пологим изменением, наклон которого близок к наклону кривой для $H_\varphi \sin \alpha$ в соответствующие интервалы времени. Этот переход в главенстве TE_2 - и TE_1 (TM_0)-нормальных волн возможен, если затухание у обеих или одной из двух ночных TE_1 - и TM_0 -нормальных волн меньше, чем у ночной TE_2 -нормальной волны, так как TE_2 -нормальная волна имеет максимальный (из трех обсуждаемых нормальных волн) коэффициент возбуждения H_0 -компонент в волноводе с нижней стенкой, имеющей конечную проводимость.

Крутое нарастание амплитуды H_0 при ведущей роли перехода TE_1^H (TM_0^H) $\rightarrow TE_1^A$ можно связать с резким возрастанием коэффициента возбуждения TE -компонент при движении захода в зоне приемника.

Интерпретация результатов измерения компоненты H_0 в период захода затруднена тем, что в ночной части волновода каждая из первых нормальных волн является носителем этой компоненты. Существенную асимметрию в поведении H_0 во время захода и восхода можно рассматривать как экспериментальное проявление этого обстоятельства. В отдельные интервалы времени восхода (рис. 1 а и рис. 3 а) наблюдаются

осцилляции амплитуды с периодом 0,6—0,9 тыс. км. Их можно пытаться связать с преобразованием дневной TM_1 -нормальной волны в ночную $TM_0(TE_1)$ -нормальные волны ($D \approx 1100$ км) и дневной TM_0 -нормальной волны в ночную TM_2 -нормальную волну ($D \approx 0,7—0,8$ тыс. км).

Проведенный анализ показывает, что измерение вторичной компоненты H_θ в дальней зоне дает дополнительную (по отношению к измерениям H_ϕ -компоненты) информацию о свойствах волноводного канала Земля—ионосфера и процессах, происходящих с электромагнитными полями в переходной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Ф. Ременец, О некоторых особенностях распространения сверхдлинных волн ночью, X Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Секция 1, изд. Наука, М., 1972, стр. 178.
2. В. И. Леонов, Г. Ф. Ременец, О. Я. Шимкин, Экспериментальная регистрация TE-компонент СДВ полей в дальней зоне, X Всесоюзная конференция по распространению радиоволн Тезисы докладов. Секция 1, изд. Наука, М., 1972, стр. 231.
3. D. D. Strohbe, J. Res. NBS, **68D**, № 1, 27 (1964).
4. Г. Ф. Ременец, Г. И. Макаров, В. В. Новиков, сб. Проблемы дифракции и распространения волн, вып. VIII, изд. ЛГУ, 1968, стр. 109.
5. С. Т. Рыбачек, сб. Проблемы дифракции и распространения волн, вып. VII, изд. ЛГУ, 1968, стр. 152.

Ленинградский государственный университет

Поступила в редакцию
15 мая 1972 г.

PHYSICAL INTERPRETATION OF DIURNAL VARIATION OF TM- AND TE-COMPONENT OF VLW FIELDS IN A FAR REGION

G. F. Remenets, V. I. Leonov

A physical interpretation of the results of TM- and TE-component measurements in sunset and sunrise conditions is given. The frequency of the electromagnetic signal is 18.6 kcs; the path of propagation is Seattle—Kamchatka. It is shown, that the measurements of TE-component in a far region give an additional information about the properties of Earth—ionosphere waveguide and about the processes, which take place with normal waves in the transition region of a day-to-night or night-to-day type.