

Том I, с. 491–494  
УДК: 537.87+621.371

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ДВ-СВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕРЗЛОТНЫХ РАДИОТРАССАХ

**В. П. Мельчинов<sup>1</sup>, А. А. Павлов<sup>1</sup>, Б. Д. Соловьев<sup>1</sup>, Ю. Б. Башкуев<sup>2</sup>, М. Г. Дембелов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет, 677000, г. Якутск, ул.Белинского,58  
E-mail: melchinovvp@mail.ru

<sup>2</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: buddich@mail.ru

**Аннотация.** Интерес к процессам излучения и распространения ДВ-СВ- радиоволн в области многолетней мерзлоты, включая арктическую зону обусловлен как с научной, так и практической стороны. В последнее время практический интерес вызван требованиями обеспечения качества работы радиотехнических систем навигации, пеленгации и управления морским, речным и воздушным транспортом в Арктических районах в указанном диапазоне частот. В условиях резко-континентального климата и продолжительности зимы 6-8 месяцев возникает необходимость прогнозирования сезонных вариаций распространения радиоволн на мерзлотных радиотрассах. В данной работе рассмотрены результаты многолетних измерений поверхностного импеданса в разные сезоны года и связанных с ними вариаций напряженности поля, проведены численные расчеты функции ослабления над многокучными импедансными радиотрассами на территории Якутии. Показана хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений модуля функции ослабления в разные сезоны года.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн; сезонные вариации, функция ослабления, поверхностный импеданс, лесослой, мерзлота, глубина протаивания

## THE SEASONAL VARIATIONS OF LF-MF ELECTROMAGNETIC WAVES ON PERMAFROST RADIO PARTHS

**V. P. Melchinov, A. A. Pavlov, B. D. Solovyev, Yu. B. Bashkuev, M. G. Dembelov**

**Abstract.** Interest in the processes of radiation and propagation of LF-MF radiowaves in the permafrost regions, including the Arctic zone, is conditioned both from a scientific and practical point of view. Recently, practical interest has been caused by the requirements of ensuring the quality of radio navigation systems, direction finding and control of sea, river and air transport in the Arctic regions in these frequency range. Under the conditions of a sharply continental climate and a winter duration of 6–8 months, it becomes necessary to predict seasonal variations in the propagation of radio waves on permafrost radio paths. This paper discusses the results of multi-year measurements of surface impedance in different seasons of the year and the associated field strength variations, and numerical calculations of the attenuation function over multi-component impedance radio paths in Yakutia. It is shown the good convergence of the calculated and experimental values of the modulus of attenuation function in different seasons of the year.

**Keywords:** radio wave propagation; seasonal variations, attenuation function, surface impedance, lumbering, permafrost, thawing depth

Проблеме изучения распространения радиоволн в ДВ-СВ диапазонах посвящено достаточно много работ. Наиболее полные данные многолетних наблюдений напряженности поля в ДВ-СВ диапазонах на разных расстояниях в Московской области приведены в работе [1]. Установлено, что напряженность поля напрямую зависит от температуры. При отрицательных температурах напряженность поля в ДВ-СВ повышается. Размах изменений уровня поля в течении года зависит от частоты и протяженности трассы. Объяснение сезонных вариаций в центральных районах России, в Томской области и в Забайкалье было дано на основе изменения электрических характеристик лесослоя при переходе от летних условий к зимним [2–5]. Лес рассматривается как

изотропный слой с проводимостью порядка  $(1,5-2,5) \cdot 10^{-5}$  Сим/м диэлектрической проницаемостью 1,2-1,3 в летних условиях. В то время как проводимость леса уменьшается при его промерзании  $(2,5-18) \cdot 10^{-6}$  Сим/м, диэлектрическая проницаемость его остается без изменений [3]. Эксперименты показали, что в летнее время года функция ослабления, а значит и напряженность поля земной волны в ДВ диапазоне возрастает, в СВ диапазоне наоборот - уменьшается. Расчеты показали, что учет лесослоя над однородной поверхностью земли приводит к увеличению модуля импеданса и сдвигу фазы импеданса в область сильноиндуктивных значений на границе воздух-лес. Особенности изменения модуля и фазы импеданса в разные сезоны года приводят к указанным выше сезонным вариациям модуля функции ослабления. Появление поверхностной волны над сильноиндуктивными структурами приводит к увеличению функции ослабления. Так в Ленинградской области на частоте 173 кГц поле волны увеличивается на 3 дБ на расстоянии в 450 км, а на частоте 549 кГц поле уменьшается на 10 дБ при переходе от зимы к лету [2]. В диапазоне средних волн ПЭВ не возникает, а наличие лесослоя приводит к значительному затуханию радиоволн в летнее время. В то время как зимой влияние лесослоя мало из-за его низкой проводимости и напряженность поля становится выше летних значений. Однако в других районах страны в ДВ-СВ диапазонах зимние значения всегда выше летних [4, 5].

Представляет интерес сравнить расчетные и экспериментальные значения  $|W|$  на разных расстояниях с учетом слоистого строения мерзлотных радиотрасс. По результатам круглогодичных измерений напряженности поля на стационарном пункте наблюдения г. Якутска наблюдались незначительные сезонные вариации в ДВ диапазоне, а в СВ диапазоне зимние значения напряженности поля в 2-3 раза меньше летних.

Для решения поставленной задачи нами были использованы результаты измерений поверхностного импеданса в разные сезоны года по радиотрассам в Центральной Якутии. Измерения поверхностного импеданса были выполнены в ДВ-СВ диапазонах по сигналам тех же радиостанций, напряженности которых предстояло измерить. Экспериментальные значения модуля функции ослабления определяли путем нормировки произведения  $E_i R_i$  вдоль радиотрассы к базовому значению  $E_0 R_0$  в ближней зоне передающей антенны:

$$|W| = \frac{E_i R_i}{E_0 R_0}, \quad (1)$$

$E$  - напряженность поля мВ/м,  $R$  - расстояние в км.

Поверхностный импеданс структуры лес над импедансной поверхностью земли рассчитывался по формулам падения плоских волн на горизонтальную границу раздела:

$$\delta_1 = \delta_л \frac{\delta_2 - j\delta_л tgk_л h_л}{\delta_л - j\delta_2 tgk_л h_л} \quad (2)$$

где  $\delta_2$  — измеренные значения поверхностного импеданса под лесом,  $\delta_л$  — характеристический импеданс лесослоя,  $h_л$  — высота лесослоя,  $k_л = \sqrt{\epsilon_л + 60} \cdot k$  — волновое число лесослоя.

Лесослой учитывался как изотропный однородный слой высотой 12 м с эффективными значениями  $\sigma_л = 1,9 \cdot 10^{-5}$  Сим/м и  $\epsilon_л = 1,3$  летом и  $\sigma_л = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Сим/м и  $\epsilon_л = 1,2$  зимой.

На рис. 1а приведены сезонные вариации модуля функции ослабления  $|W|$  и их сравнения с расчетными для частоты 171 кГц. Расчеты  $|W|$  были выполнены с использованием модуля и фазы импеданса (рис. 1б,в). Данная трасса проходит в основном по долине р. Лена и имеет протяженность около 120 км. Участок междуречья покрытый лесной растительностью с абсолютными отметками высот 200-220 м имеет протяженность около 20 км. Долина реки характеризуется аллювиальными отложениями с прослойками галечника и угленосных пород. Как видно из рис. 1а, экспериментальные значения  $|W|$  в зимнее время года выше летних. Расчеты модуля функции ослабления были выполнены с учетом рельефа трассы: был использован режим усреднения высот при вычислениях методом решения интегрального уравнения Хафффорда. Метод решения уравнения Хафффорда изложен в работе [6]. Из рис. 1б,в видно, что зимнее время года модуль импеданса преимущественно увеличивается, а фаза импеданса сдвигается в сильноиндуктивную область импедансов, что приводит к возрастанию  $|W|$  за счет возникновения поверхностной волны.

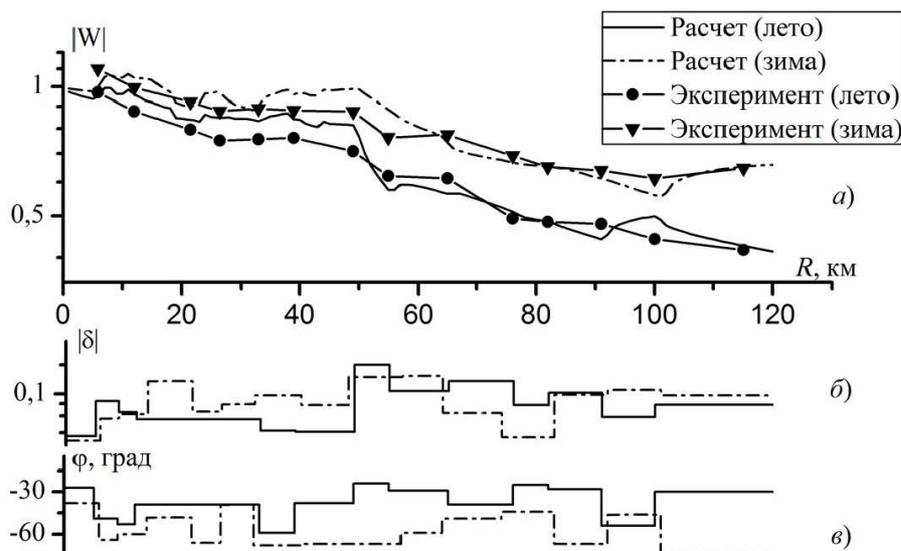


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения  $|W|$ , значения модуля и фазы импеданса в зависимости от расстояния для частоты 171 кГц.

На рис. 2 приведены аналогичные результаты для частоты 864 кГц. Из рис. 2а видно, что сезонные вариации имеют противоположный характер: зимние значения  $|W|$  ниже летних. Из анализа экспериментальных данных поверхностного импеданса следует, что при промерзании верхних слоев земли модуль импеданса на большинстве пунктов наблюдений увеличивается, а фаза импеданса не принимает сильноиндуктивных значений в любое время года. (рис. 2б,в).

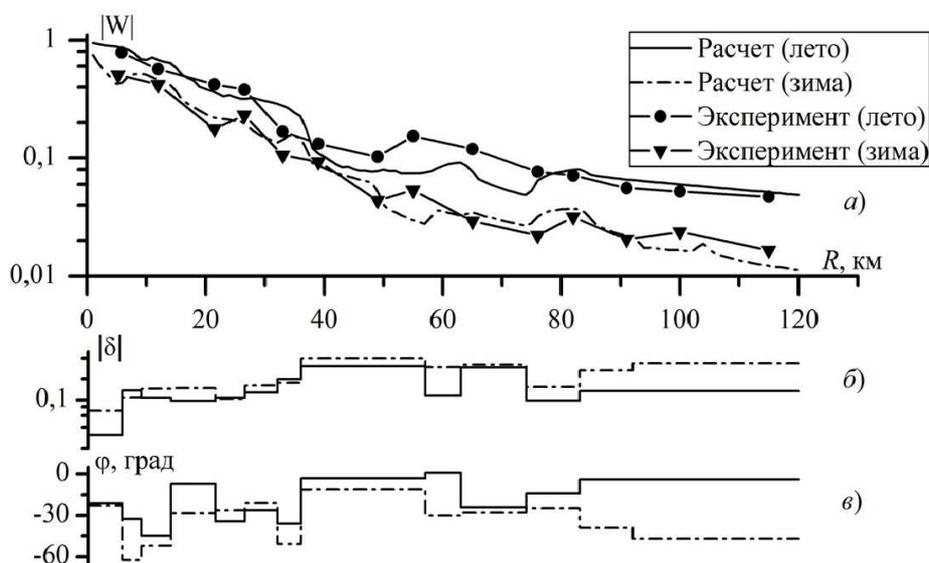


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения  $|W|$ , значения модуля и фазы импеданса в зависимости от расстояния для частоты 864 кГц.

Результаты расчетных и экспериментальных значений находятся в хорошем согласии, что свидетельствует о правильности импедансной модели радиотрассы в ДВ-СВ диапазонах.

В таблице 1 представлены сопоставления зимних  $|W_{л}|$  и летних  $|W_{з}|$  значений модуля функции ослабления для четырех радиотрасс по сигналам радиовещательных станций (п. Тулагино). В колонке для расстояний указан диапазон расстояний, на которых определялось отношение летних и зимних значений  $|W|$  для каждой трассы в зависимости от частоты. Из таблицы видно, что в СВ диапазоне зимние значения  $|W_{з}|$  меньше летних, причем с ростом частоты отношение  $|W_{л}|/|W_{з}|$  увеличивается. В ДВ диапазоне, наоборот, летние значения ниже зимних. Исключени-

Таблица 1

R, км	Трасса Намцы ( W <sub>л</sub>  / W <sub>з</sub>  )			Трасса Ханды- га ( W <sub>л</sub>  / W <sub>з</sub>  )			Трасса Амга ( W <sub>л</sub>  / W <sub>з</sub>  )			Трасса Алдан ( W <sub>л</sub>  / W <sub>з</sub>  )		
	171 кГц	549 кГц	864 кГц	171 кГц	549 кГц	864 кГц	171 кГц	549 кГц	864 кГц	171 кГц	549 кГц	864 кГц
40±8	0,83	1,42	3,26	0,84	1,88	2,52	0,83	1,83	2,91	0,67	2,29	4,47
80±6	0,73	2,24	2,38	0,66	2,13	7,24	0,76	1,60	2,71	0,92	2,09	5,84
120±9	0,64	2,85	3,05	0,67	1,82	2,71	0,85	2,50	3,13	1,2	3,49	2,77
160±10				0,53	1,97	3,32	0,79	1,50	3,78	1,08	4,27	3,12
200±10				0,42	1,40	3,84	0,82	2,00	2,59	1,53	2,03	4,04

ем является трасса Тулагино-Алдан, где с расстояния ~120 км наблюдается противоположная картина: летние значения выше зимних.

Численное моделирование распространения радиоволн показало, что сезонные вариации функции ослабления на мерзлотных трассах определяются не только влиянием параметров лесослоя, но также и изменениями геоэлектрического разреза в силу промерзания верхних слоев земли. Возрастание функции ослабления за счет возникновения поверхностной волны в ДВ в зимних условиях наблюдается на участках трассы приуроченной к залеганию мерзлых рыхлых отложений на коренных породах. В диапазоне СВ фаза импеданса имеет слабоиндуктивный характер независимо от сезона года и поверхностной волны не возникает. Изменения модуля функции ослабления в основном определяются изменениями модуля поверхностного импеданса подстилающей среды: зимой модуль поверхностного импеданса увеличивается. В условиях многолетней мерзлоты изменения параметров лесослоя оказывают меньшее влияние на величину модуля функции ослабления по сравнению с изменениями параметров геоэлектрического разреза при их сезонном протаивании-промерзании.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-41-140002 p\_a).

#### Список литературы

1. Чернов. Ю.А. Вариации уровня сигнала земной волны на средних и низких частотах в дневное время //Труды научно – исслед.института радио, 2013. № 4. С. 91 – 106.
2. М.И. Пертель, А.А. Пылаев, А.А. Штейнберг Экспериментальная оценка точности прогнозирования модуля функции ослабления в диапазоне ДВ-СВ//Проблемы дифракции и распространения радиоволн. -Л: Изд-во ЛГУ, – 1983. вып.19, – С.239-251.
3. Егоров В.А. Макаров Г.И. Влияние растительного покрова на распространение электромагнитных волн с учетом сезонных и суточных изменений температуры Вестник СПбГУ, сер.4.2006. Вып.1.С10-19.
4. Адвокатов В.Р., Башкуев Ю.Б., Шедоев А.П. Сезонные вариации напряженности поля ДВ-СВ радиостанций в условиях резко континентального климата//Тез. докл. XVII Межвед. сем. Распространение километровых и более длинных радиоволн. – Томск: 1988. – С.57.
5. В.Н. Захаренко, В.П. Парначев Влияние метеорологических условий (температуры) на распространение радиоволн КВ–СВ–ДВ диаапонов //Вестник Томского государственного университета. 2015. № 400. С. 337–344.
6. Проскурин Е.П., Пылаев А.А., Тихомиров Н.П., Штейнберг А.А. Распространение радиоволн над электрически и геометрически неоднородными трассами // Проблемы дифракции и распространения волн. - Л.: Изд-во ЛГУ, Вып. 18. 1981. С. 171-183.