

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОПТИЧЕСКИ НЕПРОЗРАЧНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

И. А. Вязьмитинов, Е. И. Мирошниченко, О. В. Сытник

*Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [ssvp11@ire.kharkov.ua](mailto:ssvp11@ire.kharkov.ua)*

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований потерь энергии электромагнитных волн дециметрового диапазона после прохождения элементов строительных конструкций с точки зрения основных требований к характеристикам РЛС обнаружения людей за оптически непрозрачными препятствиями. В качестве объектов исследования были выбраны образцы строительных конструкций и материалов, которые могут являться наиболее вероятными препятствиями при техногенных катастрофах. Исследованы зависимости затухания радиоволн от частоты и поляризации. Показана возможность приема отраженных электромагнитных сигналов дециметрового диапазона от живых подвижных объектов, находящихся за бетонными и железобетонными перекрытиями. Обсуждаются требования к условиям экспериментов и методики их проведения. Обосновывается достоверность результатов. Ил. 3. Табл. 10. Библиогр.: 19 назв.

**Ключевые слова:** радиолокатор, преграды, потери, методика.

Одна из важнейших задач, возникающих при разработке РЛС для обнаружения людей за оптически непрозрачными препятствиями, состоит в выборе оптимального диапазона рабочих частот. Очевидно, что решение задачи обнаружения цели возможно только, если радиосигнал после прохождения сквозь все преграды в обоих направлениях (от радиолокатора до цели и обратно) будет достаточен по уровню, чтобы с приемлемой вероятностью обнаружить человека. Трудность теоретического определения потерь на трассе распространения радиоволн даже при прохождении их через атмосферу, облака, туман, дождь, снег, град отмечена в работах [1, 2]. В рассматриваемых нами случаях имеется ввиду использование радиолокатора для спасения людей под завалами обломков зданий, наслоений грунтов либо других сыпучих материалов и тому подобного. При теоретической оценке потерь при прохождении радиоволн через эти препятствия возникают такие сложности, что либо оценка становится грубой, либо расчет получается очень трудоёмким [3, 4]. Это вызвано также тем, что на трассе до цели радиоволны испытывают не только поглощение, но и отражения от всевозможных неоднородностей.

В большинстве случаев с достаточной для практики точностью глубина проникновения радиоизлучения в однородную по составу среду может быть оценена по приближенной формуле [5-8]

$$\delta_p = \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''}, \quad (1)$$

здесь  $\delta_p$  – расстояние от границы раздела сред, где величина мощности ЭМВ на 4,34 дБ меньше мощности падающей волны в точке, расположенной непосредственно под поверхностью;  $\lambda$  – длина рабочей волны в свободном пространстве;

$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды; эта формула справедлива при  $\varepsilon''/\varepsilon' \ll 1$  (для большинства естественных сред, исключая материалы с высоким содержанием влаги).

Потери радиоволн в слоистых земных покровах, зерновых насыпях, снегах и других средах рассмотрены в работах [2 – 6, 9 – 13]. Варианты учёта физического состояния слоёв (влажность, плотность материалов) даны в работах [5 – 15], а контрастности переходов от слоя к слою – в работах [2, 3, 15 – 17]. Кроме того, внутри каждой группы препятствий существует множество отличий по физическим свойствам, которые существенно влияют на точность этой оценки. Результаты работ [2 – 18] (см. табл. 1-4) и расчёты по формуле (1) позволяют ориентироваться в оценках поглощения радиоволн преградами, хотя окончательные цифры, как показано в работе [11], могут отличаться на единицы и десятки децибелл.

Таблица 1  
Глубина проникновения для некоторых материалов

Материал	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$	Литература	$\delta_p$ , (м), $\lambda=3$ см
Кварцевый песок	2,3	0,003	[10,15]	2,5
Гранит	4,6	0,05	[10,15]	0,2
Базальт	5,3	0,26	[10,15]	0,042
Вода пресная	60	27,0	[5,10]	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Сухой снег	1,8	$6,0 \cdot 10^{-4}$	[5,18]	10,7
Сухой лёд	3,0	$1,2 \cdot 10^{-4}$	[5,18]	68,9
Глина - объёмное содержание влаги $-m_v$			[5,14]	
$m_v = 0,05$ /см <sup>3</sup>	3,1	0,1		0,08
$m_v = 0,34$ /см <sup>3</sup>	21	4,8		$4,5 \cdot 10^{-3}$

В табл. 2: группа А - это сухие и увлажненные пески, известняки, сланцы, влажные угли и граниты, асфальт, кирпич, бетон; группа Б - пресный лёд, мрамор, сухие угли и гранит, кальцит, доломит, гипс, каменная соль, снег.

Таблица 2  
Частотные зависимости погонного затухания -  $\gamma$  и вещественной части диэлектрической проницаемости -  $\varepsilon'$  - [3 - 5]

Частота, ГГц	Группа А		Группа Б	
	$\gamma$ , дБ/м	$\varepsilon'$	$\gamma$ , дБ/м	$\varepsilon'$
0,001	0,02	8,0	0,01	5,0
0,003	0,05	7,0	0,015	4,5
0,01	0,1	6,0	0,02	4,0
0,03	0,4	5,0	0,1	4,0
0,1	1,0	4,5	0,2	3,5
0,3	2,0	4,5	0,5	3,5
1,0	5,0	4,5	0,6	3,5
3,0	10,0	4,5	0,8	3,5
10,0	20,0	4,0	1,0	3,5

Таблица 3  
Диэлектрическая проницаемость -  $|\varepsilon|$  и тангенс угла потерь -  $\operatorname{tg} \delta$  некоторых материалов - [11]

Материал	$ \varepsilon $		$10^{-3} \operatorname{tg} \delta$	
	400, МГц	800, МГц	400, МГц	800, МГц
Древесина - береза	2,8	3,1	12	18
Древесина - сосна	2,9	3,1	14	20
Кирпич красный	3,2	3,2	11	13,5
Кирпич силикатный	3,6	3,7	9	12
Торф	3,5	3,7	5,8	9
Бетон	3,5	3,6	7	11

Таблица 4  
Ослабление электромагнитного излучения в зерновых насыпях -  $\gamma$ , дБ/м - [11]

Вид зерна	Частота, ГГц					
	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,1
Кукуруза	24,0	15,4	7,2	4,4	2,5	2,1
Пшеница	14,7	10,8	5,8	3,7	2,1	1,1
Ячмень	13,6	9,2	5,3	2,7	1,6	0,9
Рожь	16,7	10,5	7,1	4,1	2,2	1,2
Овес	13,8	8,5	5,9	3,3	2,1	1,1

Как видно из таблиц, потери радиоволн в большинстве случаев позволяют использовать радиолокаторы для обнаружения живых людей за представленными в них преградами [7, 8].

В работах [3 - 5, 19] приведенные результаты по ослаблению энергии электромагнитного излучения в строительных конструкциях

зданий соответствуют диапазону УКВ, в то время как в диапазоне дециметровых волн опубликованных данных явно недостаточно. Поэтому с целью получения дополнительных результатов в натуральных условиях были проведены эксперименты по оценке ослабления энергии электромагнитного излучения дециметровых волн различными реальными преградами для ориентирования при практическом их использовании во время разработок радиолокаторов обнаружения живых людей за обломками зданий.

**1. Методика экспериментов.** Для определения ослабления радиоволн использовался метод замещения, суть которого состоит в следующем. Создаётся трасса распространения сигнала путём установки передатчика и приёмника таким образом, что оси их встречно направленных антенн совмещены. Когда на трассе нет преград, производится калибровка с учетом уровня мощности сигнала на входе антенны передатчика и уровня сигнала на выходе регистрирующего устройства приёмника. Затем между антеннами передатчика и приёмника помещается исследуемый образец. Разность в уровнях сигнала на входе антенны передатчика в децибеллах при одном и том же уровне сигнала на выходе приёмника определяет потери энергии радиоволн на трассе за счет поглощения в преграде и отражений от её структур. Калибровка проводилась на каждой рабочей частоте для исключения частотных зависимостей в трактах измерительной установки. Основные особенности этого метода, которые определяют ошибки измерения при использовании его в натуральных условиях, рассмотрены ниже.

*Влияние изменения мощности генератора и коэффициента усиления усилителя приемника.* Для экспериментов использовался генератор СВЧ типа Г4-121 при постоянном уровне амплитудной модуляции его сигнала (50%) синусоидальным сигналом с частотой 2 кГц.

Схема измерительной установки показана на рис. 1. Расстояние для калибровки измерительной установки  $-L = R_1 + H + R_2$ . Площадь апертур антенн  $20 \times 30 \text{ см}^2$ . За время между калибровкой и измерениями изменение мощности генератора и коэффициента усиления усилителя приемника в разных по сложности опытах могло достигать 1,5 дБ. Поэтому большое внимание уделялось относительным результатам, когда после цикла калибровок без изменения параметров излучения и приёма проводились измерения с различными объектами или менялись отдельные условия (например, поляризация, частота). Ошибка измерений при этом снижалась и в максимуме могла достигать  $\pm 1,0 \text{ дБ}$  (20%).

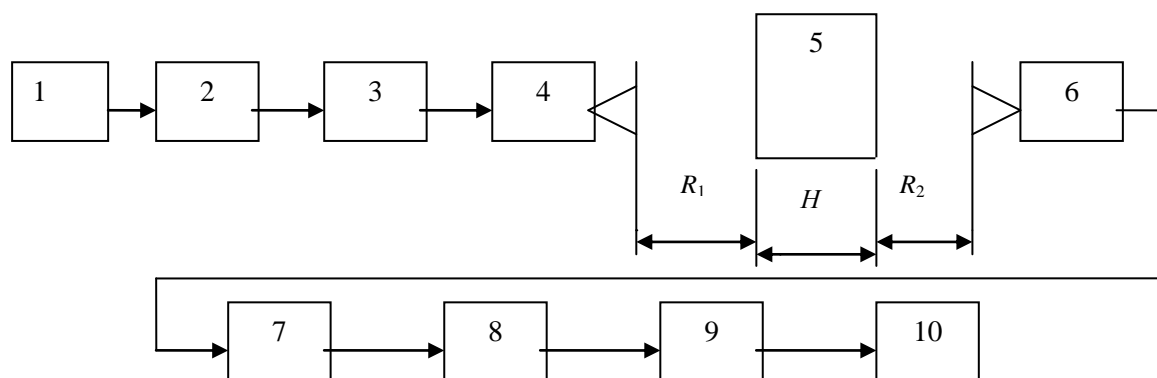


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 - генератор СВЧ; 2 - калиброванный аттенюатор; 3 - отрезок кабеля; 4 - антенна передатчика; 5 - исследуемый объект;  $R_1$  и  $R_2$  - расстояния до объекта;  $H$  - толщина преграды; 6 - антенна приемника; 7 - отрезок кабеля; 8 - детектор; 9 - усилитель; 10 - осциллограф

*Влияние диаграмм направленности антенн.* Для эксперимента использовались широкополосные рупорные антенны из комплекта измерительного приемника П6-23А, которые имеют диаграммы направленности с уровнем боковых лепестков в дальней зоне около  $-13$  дБ. При значительных поглощениях в образцах уровень сигнала, излученного по боковым лепесткам и принятого в обход преграды за счет отражения от различных местных предметов, может быть сравнимым и даже больше прямого сигнала, что может дать значительные ошибки эксперимента. Оценка наличия такого сигнала производилась по изменению уровня на выходе приемника после исключения прохождения его по боковому излучению с помощью установки поглотителя по краям образца и в конце зоны Френеля антенны передатчика. Кроме того, при опытах обычно обеспечивалось изолирование зоны передатчика (до преграды) от зоны приемника (после преграды) путём выбора преград с большими поперечными размерами. Ошибка измерений при этом могла достигать  $\pm 1,0$  дБ.

*Прохождение сигнала мимо преграды за счет дифракции.* Если исследуемый образец представлял собой бетонный столб с поперечными размерами, сравнимыми с шириной луча передатчика, то уровень сигнала на входе приемника за счет дифракции может влиять на величину ошибки эксперимента. Определение наличия такого сигнала и оценка его влияния на точность результата производились путём установки поглотителя в зонах дифракции (по краям объекта). Снижение его уровня достигалось уменьшением размеров основной зоны облучения при приближении антенн к препятствию. Ошибка измерений при этом могла достигать  $\pm 1,0$  дБ. На практике (в случае наличия обломков строительных конструкций) можно ожидать уменьшения ослабления сигнала за счёт многолучевого распространения и дифракции.

*Влияние нелинейных эффектов в приемнике.* Для устранения влияния нелинейных эффектов в приемнике использовалась калибровка путем получения одного и того же уровня сигнала на экране осциллографа с помощью калиброванных аттенюаторов, установленных между генератором передатчика и кабелем к его антенне. Поскольку для измерений использовались фиксированные аттенюаторы с дискретом 3 дБ, уточнение результатов проводилось по заранее снимаемой интерполяционной кривой. Калибровка производилась каждый раз при смене расстояния между раскрывами антенн передатчика и приемника. Причем фиксировались на каждой частоте мощность передатчика, данные аттенюаторов, расстояния между антеннами и уровни сигналов на экране осциллографа. Точность калибровки в опытах была не хуже  $\pm 1,5$  дБ. При расстояниях между антеннами менее 2,0 м и малых уровнях потерь (до 15 дБ) она была не хуже  $\pm 1,0$  дБ. Относительная точность (разница в результатах на одной частоте при различных образцах без переналадок) была не хуже  $\pm 0,2$  дБ (около 5%). Точность отсчета по индикатору - не хуже  $\pm 0,2$  дБ.

*Влияние паразитных сигналов.* Уровень паразитных сигналов, прошедших сквозь радиочастотный кабель и его разъемы, достигает  $-20$  дБ по отношению к пришедшему на антенну передатчика. Особенно большой вклад в ошибку этот сигнал дает при калибровке с большими уровнями поглощения калиброванными аттенюаторами. Это влияние заметно как при калибровке, так и при большом уровне потерь в преграде, если хотя бы один её поперечный размер менее 1 м. Максимальная ошибка измерений при этом в некоторых опытах достигала  $\pm 1,0$  дБ.

*Влияние интерференции.* Для некоторых видов преград (кирпичная кладка, армированный бетон) наблюдается различная величина ослабления в разных местах при прохождении сигнала

сквозь объект (неравномерность структуры преграды). В результате при значительной ширине луча передатчика за преградой, где может находиться цель, возникает интерференционная картина за счёт суперпозиции волн, отражённых от неоднородностей исследуемой структуры, не позволяющая достаточно точно оценить уровень потерь. Для уменьшения влияния этого эффекта использовались остронаправленные антенны в передатчике и приёмнике и уменьшалось расстояние между ними до предельно возможного. Перемещение приёмной антенны вдоль её оси и в плоскости, перпендикулярной оси её луча, позволяло оценить влияние интерференции радиоволн за преградой, поскольку в реальных условиях это влияние должно играть свою роль при определении вероятности обнаружения цели за преградой. Ошибка измерений за счёт интерференции менялась в зависимости от типа преграды, при этом она могла достигать  $\pm 1,5$  дБ.

*Влияние неточности определения расстояний.* Расстояния между антеннами и толщина преград определялись с точностью не хуже 1 см, что вносило ошибку в определение величины поглощения не более 0,1 дБ. Явление эквивалентного увеличения длины пути радиоволн за счёт прохождения в препятствии с  $\epsilon$  более 1 при калибровке не учитывалось.

**2. Результаты экспериментов.** *Объект исследований - дверь стандартная деревянная с ДВП стенками.* Потери -  $0,5 \pm 0,2$  дБ. Перемещение соосной пары антенн вдоль поверхности двери результата не меняло. Ошибка измерений минимальна (определяется только точностью установки антенн и точностью отсчёта на экране осциллографа) -  $\pm 0,2$  дБ.

*Объект исследований - кирпичная стена, покрытая штукатуркой и окрашенная.* Кирпич стандартный силикатный. Толщина штукатурки - 0,5 - 1,0 см. Толщина стены - 13 - 14 см. Расстояние между антеннами -  $41 \pm 1$  см и  $152 \pm 1$  см. Расстояние  $R_1$  (см. рис. 1) менялось от 15 до 45 см.

Были проведены измерения при перемещении соосной пары антенн вдоль поверхности стены. Установлена неравномерность потерь в стене, что объясняется неравномерностью укладки раствора между кирпичами. Поскольку апертура антенн по размерам больше одного кирпича, то потери сравнительно плавно менялись при перемещении по поверхности стены.

Отсчет проводился после получения максимума сигнала при поворотах приемной антенны по углу места и азимуту, что исключало ошибку из-за несоосности антенн. Как правило, максимум сигнала был при параллельном расположении апертур. Максимальная относительная ошибка измерений при перемещениях антенн - не более

$\pm 0,2$  дБ. Величина ослабления сигнала менялась от 1,2 до 2,4 дБ на частоте 800 МГц и от 1,2 до 3,0 дБ на частоте 1800 МГц. Ошибка измерений в любой точке привязки - не более  $\pm 0,5$  дБ (определялась только ошибками отсчёта и определения расстояний). При изменении расстояния  $R_1$  от апертуры антенны передатчика до стены результаты практически не менялись. От направления поляризации излучения зависимость не обнаружена.

*Две стены, расположенные параллельно на расстоянии  $56 \pm 1,0$  см друг от друга.* Эксперимент дал аналогичный предыдущему опыту по характеру результат в диапазоне частот от 800 до 1800 МГц при изменении ослабления от 1,5 до 4,9 дБ. Обеспеченная относительная ошибка измерений при перемещениях антенн - не более 0,2 дБ. Ошибка оценки абсолютной величины ослабления - не более  $\pm 0,5$  дБ. Деполяризация волны отсутствовала.

*Штукатуренная и покрашенная стена из двух кирпичей (общая толщина 28 см).* Расстояние между апертурами антенн -  $L = 99$  см. Величина ослабления представлена в табл. 5.

Таблица 5  
Зависимость ослабления в стене от частоты

Частота, МГц	Ослабление, дБ
800	3,9
1000	4,9
1400	2,4
1800	4,0

Снижение потерь на частоте 1400 МГц можно объяснить резонансными явлениями отражений в кирпичной кладке данного типа ( $\epsilon / \approx 3,0 - 3,5$  для силикатного кирпича [11], а длина волны в нём на частоте 1,4 ГГц примерно 13 - 14 см; коэффициент отражения при этом - 1 - 1,5 дБ). Разброс результатов за счёт неоднородностей внутри образца при перемещениях вдоль стены уменьшился до значений менее 0,5 дБ. Абсолютная ошибка измерений при этом достигала  $\pm 0,5$  дБ, относительная -  $\pm 0,2$  дБ.

Изменение направления поляризации не приводит к изменению результатов эксперимента. Деполяризация волны отсутствовала.

*Объект исследований - плита перекрытий.* Плита перекрытий (условно, №1) между этажами промышленного здания. Железобетонная плита толщиной 21 - 22 см ( $H_1 = 21$  см) - стандартная (ПК-1200), покрытая слоем раствора ( $H_2 = 6$  см) и линолиумом ( $H_3 = 0,5$  см) (см. рис. 2).

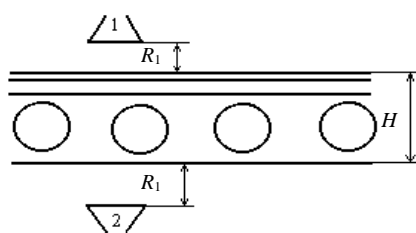


Рис. 2. Геометрия эксперимента: 1 - передающая антенна,  $R_1=7$  см,  $H=H_1+H_2+H_3=27-28$  см,  $R_2=95$  см; 2 - приемная антенна. Расстояние между антеннами -  $L=R_1+R_2+H=127-128$  см

Производилось плавное (с малыми дискретными) перемещение передающей антенны вдоль поверхности плиты на 20 см в перпендикулярных направлениях. Поляризация - поперёк плиты (вектор поля  $\vec{E}$  параллелен поверхности плиты и перпендикулярен осям полостей внутри её). Величина потерь изменялась так, как показано в табл. 6.

Таблица 6  
Зависимость ослабления плитой перекрытия от частоты

Частота, МГц	Ослабление, дБ
800	14...16
1000	12...16
1400	16...18
1800	6...10

Как видно, при небольших толщинах преград потери на более низкой частоте могут быть больше. Предполагается, что это связано с отражениями от ячеистой структуры арматуры.

Ошибка измерений при этом достигала величины  $\pm 1,5$  дБ (на ошибку измерений оказывала влияние нестабильность установки мощности генератора после калибровок и нелинейность приемного тракта; влияние интерференции включено в разброс результатов при перемещениях). Приемная антенна не двигалась.

*Объект исследований – плита перекрытий (№2).* Условия опыта аналогичны условиям предыдущего, однако плита другая - ПК-1400, хотя такой же конструкции. Условия позволяли менять поляризацию и перемещать антенны (сосную пару) вдоль поверхности плиты с любым дискретом по расстоянию.

В табл. 7 приведены результаты эксперимента. Символ  $\uparrow$  обозначает  $E$ -поляризацию волны поперёк плиты, символ  $\rightarrow$  обозначает  $E$ -поляризацию волны вдоль плиты (параллельно внутренним полостям и длинной стенке её) при нормальном падении волны на плоскость плиты. Положение №1 передающей антенны - случайное, заранее установленное в начале опыта.

Таблица 7

Зависимость ослабления плитой перекрытия от частоты, положения антенн и поляризации

Частота, МГц	Поляризация	Ослабление, дБ	Положение передающей антенны на плите
1800	$\rightarrow$	10	№1
1800	$\uparrow$	16	№1
1800	$\rightarrow$	12	№1(повтор)
1800	$\uparrow$	16	№1(повтор)
1800	$\uparrow$	12	№2 (сдвиг к краю поперек плиты на 7 см)
1800	$\uparrow$	12,6	№3(сдвиг к краю поперек плиты на 10 см)
1800	$\uparrow$	12,6	№4 (сдвиг от №3 вдоль плиты на 10 см)
1800	$\uparrow$	11,2	№5-сдвиг к краю плиты на 7,5 см от №1 (по минимуму потерь)
1000	$\uparrow$	14,1	№5
1000	$\rightarrow$	18	№5
1000	$\rightarrow$	15	№1
1000	$\uparrow$	13	№1
1000	$\uparrow$	12,7	№4 (минимум потерь на плите)

Как видно из эксперимента, при вращении поляризации можно получить минимальные потери на всех частотах, величины которых существенно отличаются друг от друга. Максимальная ошибка измерений при этом достигала  $\pm 1,0$  дБ (условия опыта позволили уменьшить влияние на ошибки измерений нестабильности установки мощности передатчика и нелинейности трактов приёмника).

По результатам табл. 7 на рис. 3 приведены графики потерь -  $\Gamma$ , дБ, где показана схема эксперимента, привязанная по размерам к шкале графиков.

На рис. 3:  $AУ_{\text{ПРД}}$  и  $AУ_{\text{ПРМ}}$  - антенные устройства передатчика и приёмника соответственно.  $\Delta L$  - смещение антенн вдоль поверхности плиты перпендикулярно осям полостей. Учитывая то, что между полостями плиты уложена арматура, из рисунка можно иметь представление о влиянии её структуры на характеристики поля за плитой.

Уровень ослабления при перемещениях антенн по плоскости плиты менялся на 2,5 - 3,5 дБ.

Деполяризация сигнала практически отсутствовала (была меньше ошибок измерений).

*Объект исследований – слой земли толщиной 25 см.* Условия опыта:

- Вариант первый: сухая земля - супесчанник (смесь земли для комнатных цветов без удобрений) уплотнённый в деревянном ящике высотой - 27 см, шириной - 40 см, длиной - 50 см.

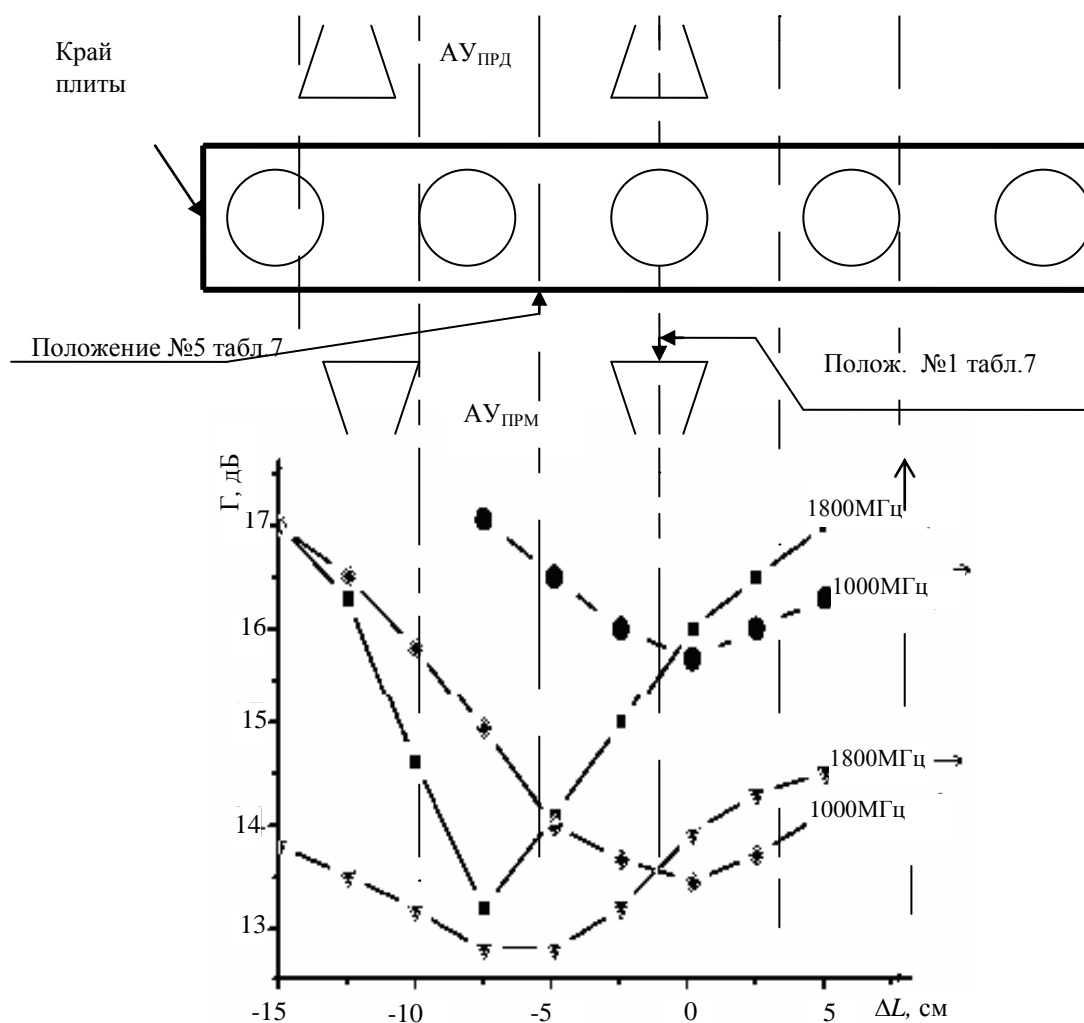


Рис. 3. Зависимость ослабления сигнала в преграде от частоты и положения антенн, максимальная ошибка измерений не более  $\pm 1,0$  дБ

Передающая антенна устанавливалась на высоте 7 см от земли. Ящик с землёй устанавливался на железобетонной плите перекрытий так, что антенны находились на отметке №3 предыдущего опыта. В остальном условия опыта не отличались от условий предыдущего опыта (т. е. необходимо учесть потери в бетонной плите перекрытий); *E*-поляризация - перпендикулярно осям полостей плиты перекрытий (поперёк плиты), на которой стоял ящик с землёй.

- Вариант второй: та же земля, смоченная по поверхности. При этом 1 л воды равномерно распылили на поверхность и накрыли хлорвиниловой плёнкой от высыхания.

Опыт провели через 30 мин после того, как слой влажной земли достиг толщины примерно 1,5 см. Остальные условия опыта второго варианта не отличались от опыта первого. На частотах 1000 и 1800 МГц слой сухой земли дал прибавку к величине потерь в плите  $4 \pm 0,2$  дБ. Поворот поляризации волны на продольную по отношению к плите дал прибавку к величине по-

терь в плите 5 дБ, т. е. разница в результатах около 1 дБ (в пределах точности эксперимента).

На частоте 1800 МГц увлажнение дало прибавку к потерям в сухой земле с бетонной плитой  $7 \pm 0,2$  дБ, а на частоте 1000 МГц –  $4,4 \pm 0,2$  дБ.

Общие потери в слое земли толщиной 25 см с увлажнением толщиной 1,5 см на частоте 1800 МГц составили 11 - 12 дБ, на частоте 1000 МГц – 8,4 - 9 дБ. Потери плавно росли после момента смачивания с течением времени, а затем (после 30 мин) стали плавно уменьшаться (плёнка снята) по мере высыхания земли.

*Объект исследований – бетонные плиты лестничного пролёта.* Объект состоит из железобетонной конструкции лестничного марша толщиной 12 см, на которой на цементном растворе закреплены железобетонные плиты ступенек толщиной 4,5 см. Ячейки арматуры имеют форму прямоугольников, большая сторона которых (длина) уложена параллельно большей стороне прямоугольника ступеньки.

Общая толщина железобетона - 16,5 - 17 см.

Условия опыта аналогичны предыдущим. Результаты приведены в табл. 8. Положение антенн №1 - случайное, положение №2 выбрано рядом с №1 на расстоянии около 12 см путём поисков перемещением антенн по минимуму потерь на частоте 800 МГц.

↑ - *E*-поляризация волны выбрана перпендикулярной большей стороне прямоугольника ячейки арматуры (поперёк плиты ступеньки и вдоль лестничного марша).

→ - *E*-поляризация вдоль плиты ступеньки.

Максимальная ошибка результатов измерений при этом достигала ±1,0 дБ.

Как видно, результаты не сильно отличаются друг от друга и есть общая тенденция к уменьшению потерь с укорочением длины волны.

При сравнительно небольшой толщине плит это можно объяснить шагом арматуры внутри плит (в ступеньке продольная ширина её ячейки значительно больше поперечной; в основании лестничного пролёта ячейки арматуры примерно такие же, но по положению в пространстве проекции центров их плоскостей на горизонтальную плоскость не совпадают с проекциями центров ячеек ступенек, поэтому и точки минимальных потерь на разных частотах разные).

Таблица 8

Зависимость ослабления плит лестничного пролёта от частоты, положения антенн и поляризации

Частота, МГц	Поляризация	Ослабление, дБ	Положение антенн
800	→	7,4 - 13	От №1 до №2
800	→	11,3	№1
800	↑	7,9	№1
1000	↑	4,8	№1
1000	↑	3,6	№2
1000	→	7,5	№2
1400	→	8,0	№1
1400	↑	3,9	№2
1400	→	4,9	№2
1800	→	5,9	№1
1800	↑	4,0	№1

*Объект исследований – вертикальная железобетонная плита-стена толщиной 12 см на улице в недостроенном здании.* Общие условия аналогичны предыдущему опыту. Отличие в том, что погода поздней осенью была сырая, хотя поверхность стены не имела видимых следов влаги. Арматура в стене имела вид клетки, где её ячейки составлялись горизонтальными тонкими прутьями на расстоянии 7 см и толстыми вертикальными прутьями на расстоянии 30 - 35 см друг от

друга. Положение оси антенн выбиралось по минимуму поглощения в плите. Результаты сведены в табл. 9.

Таблица 9

Зависимость ослабления плиты-стены от частоты, положения антенн и поляризации

Частота, МГц	Поляризация	Ослабление, дБ
1000	→	7,7
1000	↑	2,4
1000	↑	2,4 - 7
1800	↑	6
1800	→	9
1800	↑	6,0 - 8,4

Максимальная ошибка каждого результата измерений при этом достигала ±1,5 дБ (основной вклад в ошибку вносило влияние нестабильности мощности генератора передатчика, усиления приёмника и интерференции).

На вертикальной поляризации даны разбросы результатов при перемещениях вдоль поверхности стены.

Предполагается, что некоторое увеличение потерь на частоте 1800 МГц по сравнению с ослаблением на частоте 1000 МГц связано с сезонной влажностью материала плиты.

*Объект исследований – две плиты железобетонного перекрытия между двумя этажами.* Антенна передатчика перемещалась в горизонтальной плоскости. Антенна приёмника располагалась аналогично схеме, показанной на рис. 3, но с тем отличием, что между плитами перекрытий было пространство промежуточного этажа. Расстояние между плитами 386 см, между антеннами – 510 см. На этом же расстоянии была проведена калибровка. Результаты сведены в табл. 10.

Номера опытов соответствуют порядку их проведения во времени. Перемещение передающей антенны (приёмная антенна не перемещалась, менялась только поляризация) по поверхности плиты показало (также как и в опытах с одной плитой перекрытий) разный характер структуры потерь при одинаковых положениях антенн на частотах 1000 и 1800 МГц. Особенность этих опытов в том, что максимальные потери на частоте 1800 МГц здесь больше, чем на частоте 1000 МГц, что связано с большим поглощением на более короткой волне в большей толще бетона. Наблюдалось большее влияние арматуры в отдельных точках и большего числа отражающих разделов сред. Однако неравномерное поле между плитами из-за интерференции сигналов после прохождения первой плиты также могло дать свой эффект. Следует отметить неизменную величину ослабления поля в опытах при переме-

щении передающей антенны вдоль воздушных внутренних труб плиты, где нет арматуры. Деполяризация практически отсутствовала.

Таблица 10  
Зависимость ослабления двумя плитами перекрытий от частоты, положения антенн и поляризации

Частота, МГц	Поляризация	Потери, дБ	Положение антенн
1000	→	26	№4
1000	→	32	№3
1000	→	29	№2
1000	→	26	№1
1000	→	29	№5
1000	↑	21	№3
1000	↑	22	№2
1000	↑	21	№1
1000	↑	19	№4
1000	↑	18	№5
1000	→	23	№6
1800	→	29	№3
1800	→	29	№2
1800	→	26	№1
1800	→	29	№4
1800	↑	34	№6
1800	↑	29	№5
1800	↑	32	№4
1800	↑	31	№1
1800	↑	31	№2
1800	↑	31	№3
1800	→	29	№5
1800	→	29	№4
1800	→	26	№1
1800	→	26	№1
1800	↑	32	

Максимальная ошибка измерений при этом достигала величины  $\pm 1,5$  дБ (основной вклад в ошибку вносило влияние нестабильности мощности генератора передатчика, усиления приёмника и интерференции).

*Объект исследований – стандартная колонна промышленных зданий из напряжённого железобетона.* Толщина колонны – 40 см. Расстояние между антеннами – 82 см. Потери распространения на волне 1000 МГц –  $18 \pm 0,5$  дБ независимо от поляризации; на волне 1800 МГц –  $23,5 \pm 0,5$  дБ и также не зависят от направления поляризации. Деполяризация практически отсутствовала.

Максимальная ошибка измерений при этом достигала величины  $\pm 0,5$  дБ (основной вклад в ошибку вносило влияние паразитных сигналов, интерференции и дифракции; снижение этих вкладов было получено путём обкладывания края колонны поглотителем).

*Объект исследований – кирпичная стена одинарная (толщина 15 см), кирпичная стена двойная (две параллельных одинарных стены).* Условия эксперимента: угловой поворот оси соосно расположенных антенн передатчика и при-

ёмника относительно нормали к плоскости объекта. Поворот осуществлялся в двух перпендикулярных плоскостях на угол до  $\pm 35^\circ$ . В результате отмечено, что величина ослабления энергии поля в данном случае на частотах 1000 и 1800 МГц была практически неизменной (т. е. уровень потерь менялся в пределах  $\pm 0,5$  дБ).

**Выводы.** В результате проведенных экспериментов можно с достаточной для использования в практических расчётах уверенностью сделать следующие выводы:

- ослабление поля радиоволны кирпичными стенами - не более 6 дБ при толщине стен до 0,3 м; потери не зависят от используемой длины волны;

- потери в железобетонных плитах перекрытий толщиной около 0,2 м - не более 12 дБ;

- ослабление в слое супесчаного грунта толщиной около 0,25 м - не более 4 дБ;

- потери в слое супесчаного грунта толщиной около 0,25 м, увлажнённом со стороны передатчика на 1,5 см толщины, - от 8,5 дБ на волне 1000 МГц до 11 дБ на волне 1800 МГц;

- потери в двух железобетонных плитах перекрытий, разнесённых по трассе распространения радиоволн на 386 см, - до 18 дБ на волне 1000 МГц и до 23 дБ на волне 1800 МГц.

Поворот поляризации в некоторых случаях позволяет снизить потери при распространении радиоволн дециметрового диапазона в железобетонных плитах строительных конструкций. Опытов с круговой поляризацией не проводилось.

По полученным данным можно с уверенностью сделать вывод о выборе рабочей длины волны –  $\lambda_0$  переносного радиолокатора для спасателей в интервале их частот 1600 - 2000 МГц, а не 800 - 1200 МГц, поскольку с укорочением длины волны уменьшаются габариты антенной системы при сохранении технических характеристик, а потери начинают заметно возрастать на волнах короче  $\lambda_0 = 15$  см только при увлажнении поверхности преград.

Величины потерь при распространении радиоволн дециметрового диапазона, полученные в этих экспериментах, в основном согласуются с данными, полученными в работах других авторов [1 – 6, 9 - 19].

Хотя набор объектов для экспериментов невелик, точность и разнообразие этих результатов вместе с полученными ранее позволяют в большинстве случаев использовать их в практических расчётах при создании радиолокаторов для обнаружения живых людей под завалами зданий, осыпях грунта, песка, зерна, снега и т. п.

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника, пер. с англ. под общей ред. К.Н.Трофимова. - М.: Сов. радио, 1976. - 1. - 456 с.



2. *Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А.* Радиолокация слоистых земных покровов. - М.: Сов. радио, 1977. - 176 с.
3. *Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. - М.: Недра, 1986. - 128 с.
4. *Масалов С. А., Пузанов А. О.* Дифракция видеоимпульсов на слоистых диэлектрических структурах // Радиофизика и радиоастрономия. - 1997. - 2, №1. - С.85-94.
5. *Cook J. C.* Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks // Geophysics, - 1975. - 40, №5. - P.865-885.
6. *Ulaby F. T., Moor R. K. and Fung A. K.* Microwave Remote Sensing Active and Passive. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Reading, M.A. Eddison. - Wisley. - 1982. - 11. - 612 p.
7. *Вязьмитинов И. А., Мирошниченко Е. И., Сытник О. В.* Особенности построения РЛС для обнаружения людей под завалами // Радиофизика и электроника. - Харьков, - 2004. - 9, №2. - С.452-462.
8. *Вязьмитинов И. А., Мирошниченко Е. И., Сытник О. В.* Особенности построения технических систем для обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами // Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А. Ю. Гринёва. - М: Радиотехника, 2005. - Гл. 19. - С.373-407.
9. *Кофман Л. Н.* Затухание радиоволн в горных породах // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации. - Рига: ВНИИГА. - 1980. - С.61-65.
10. *Кузьмин В. В., Сугак В. Г.* К возможности радиофизического мониторинга верхней поверхности структуры Земли // Радиофизика и радиоастрономия. - 1997. - 2, №3. - С.274-280.
11. *Иванов Н. И., Иванова Е. П., Толубенко В. Г.* Потери электромагнитного излучения в зерновых насыпях // Проблемы пожарной безопасности. - Харьков: ХАИПБ МВД Украины. - 2000. - Вып. 7. - С.102-105.
12. *Калмыков А. И., Тимченко А. И., Щербинин И. В.* Возможности исследования подповерхностных объектов с помощью радиолокационного зондирования. - Харьков, 1990. - 26 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; №90-13).
13. *Тимченко А. И.* Особенности подповерхностного радиолокационного зондирования природных объектов // Докл. АН СССР - 1987. - 297, №5. - С.1091-1094.
14. *Лецацкий Ю. И., Улянычев Н. В.* Расчёт электрических параметров песчано-глинистых грунтов на метровых-сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. - 1980. - 23, №5. - С.530-532.
15. *Дворецкий П. И., Попов С. Б., Ярмахов И. Т.* Исследование распространения электромагнитных импульсов в слоисто-неоднородных средах с потерями // Радиотехника и электроника. - 1996. - 41, №12. - С.1448-1461.
16. *Калмыков А. И., Фукс И. М., Цимбал В. Н. и др.* Радиолокационные наблюдения сильных отражателей, расположенных под слоем почвы. Модель подповерхностных отражений. - Харьков, 1993. - 30 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; №93-6).
17. *Hocktra P., Delaney A.* Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies // J.Geophys. Res. - 1974. - 79. - P.1699-1708.
18. *Синицин Ю. М., Зубенко Н. В.* Диэлектрические свойства льда и снега. - Харьков, 1981. - 43 с. (Препр. / АН УССР.

Ин-т радиофизики и электрон. Радиофизика и электроника; №166).

19. *Honcharenko W., Berfoni A. L.* Transmission and reflection characteristics at concrete block walls in the UHF bands proscol for future PCS // IEEE Traans. - 1994. - AP-43, №2. - P.232-239.

## RESULTS OF THE RESEARCHES OF WEAKENING OF THE ENERGY OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY OPTICALLY OPAQUE BARRIERS

I. A. Vyazmitinov, Y. I. Myroshnychenko,  
O. V. Sytnik

In work the results of experimental researches of losses of electromagnetic waves are examined in optically opaque environments from point of the basic requirements to descriptions detection of people after the optically opaque obstacles. As the objects of research the standards of building constructions and materials which can be the most credible obstacles at man-caused catastrophes were chosen. Dependences of fading of radio waves are explored on frequency. Possibility of reception of the reflected electromagnetic signals is shown from living movable objects being after concrete ceilings. The requirements are discussed to condition of experiments and method of their conducting. Authenticity of results is motivated.

**Key words:** radar, barriers, losses, methods.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСЛАБЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ОПТИЧНО НЕПРОЗОРИМИ ПЕРЕШКОДАМИ

I. А. Вязьмітинов, Є. І. Мирошниченко,  
О. В. Ситнік

Розглядаються результати експериментальних досліджень втрат енергії електромагнітних хвиль дециметрового діапазону після проходження елементів будівельних конструкцій з погляду основних вимог до характеристик РЛС виявлення людей за оптично непрозорими перешкодами. Як об'єкти дослідження були обрані зразки будівельних конструкцій і матеріалів, що можуть бути найбільше ймовірними перешкодами при техногенних катастрофах. Досліджені залежності загасання радіохвиль від частоти та поляризації. Показано можливість прийому відбитих електромагнітних сигналів дециметрового діапазону від живих рухливих об'єктів, що знаходяться за бетонними і залізобетонними перекриттями. Обговорюються вимоги до умов експериментів і методики їхнього проведення. Обґрунтовується вірогідність результатів.

**Ключові слова:** радіолокатор, перешкоди, втрати, методика.

*Рукопись поступила 31 января 2007 г.*