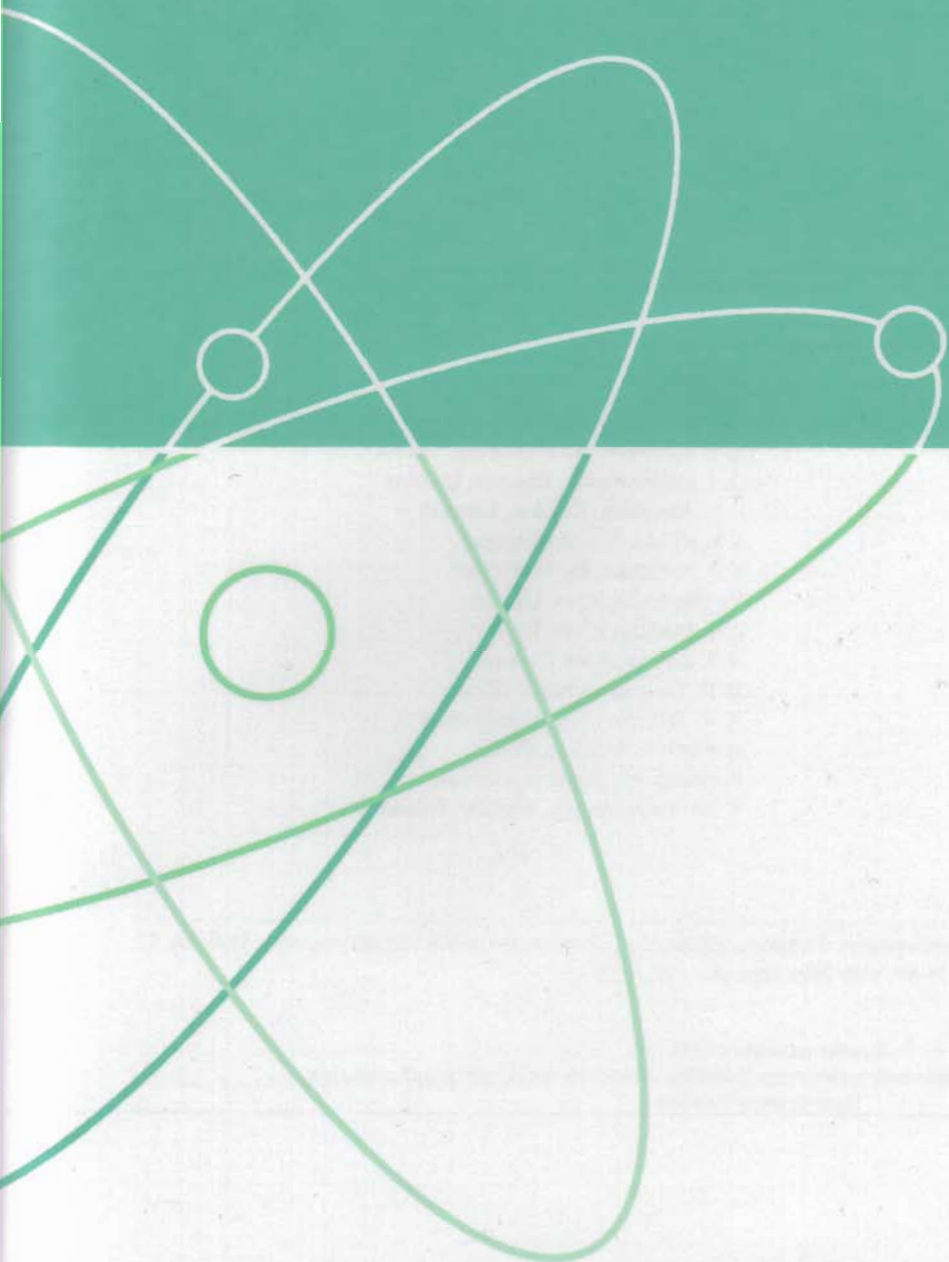


Том 59, № 7 (649)
июль 2016

ISSN 0021-3470

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

**ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ**



**ИЗДАНИЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»**

Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника
(Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika) ISSN 0021-3470 (Russian version)
Radioelectronics and Communications Systems ISSN 0735-2727 (English version)

Главный редактор:

Дубровка Федор Федорович

Проф., д.т.н., радиотехнический факультет, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Editor-in-Chief

Fedor F. Dubrovka

Prof., Dr. Sci., Faculty of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

Адрес для корреспонденции: «Известия вузов. Радиоэлектроника», пр-т Победы 37, корп. 17, НТУУ «КПИ», Киев-56, 03056, Украина. Тел.: (+38 044) 204-82-31, (+38 044) 204-90-41. Факс: (+38 044) 204-82-31.
E-mail: info@radio.kpi.ua. Web: <http://radio.kpi.ua>.

Зам. главного редактора

А. И. Рыбин, Киев, Украина
А. В. Кисляковский, Киев, Украина
В. И. Правда, Киев, Украина

Ответственный секретарь

С. Н. Литвинцев, Киев, Украина

Редакционная коллегия

И. А. Анисимов, Киев, Украина
П. А. Бакулев, Москва, Россия
Д. М. Ваврив, Харьков, Украина
Д. И. Воскресенский, Москва, Россия
В. И. Гузь, Киев, Украина
Т. Достал, Прага, Чехия
О. О. Дробахин, Днепропетровск, Украина
С. Я. Жук, Киев, Украина
А. А. Кириленко, Харьков, Украина
О. И. Клесов, Киев, Украина
А. С. Коротков, Санкт-Петербург, Россия
Д. И. Леховицкий, Харьков, Украина
П. Н. Мележик, Харьков, Украина
Дж. Модельски, Варшава, Польша
В. И. Найденко, Киев, Украина
Ю. М. Поплавко, Киев, Украина
И. Н. Прудюс, Львов, Украина
В. И. Слюсар, Киев, Украина
В. П. Таращенко, Киев, Украина
А. П. Трифонов, Воронеж, Россия
А. П. Царёв, Щецин, Польша
П. Эденгофер, Бохум, Германия
Е. М. Ящишин, Варшава, Польша

Deputy Editors

A. I. Rybin, Kyiv, Ukraine
A. V. Kislyakovskii, Kyiv, Ukraine
V. I. Pravda, Kyiv, Ukraine

Secretary

S. N. Litvintsev, Kyiv, Ukraine

Editorial Board

I. O. Anisimov, Kyiv, Ukraine
P. A. Bakulev, Moscow, Russia
D. M. Vavriv, Kharkiv, Ukraine
D. I. Voskresenskii, Moscow, Russia
V. I. Gouz, Kyiv, Ukraine
T. Dostal, Prague, Czech Republic
O. O. Drobakhin, Dnipropetrovsk, Ukraine
S. Ya. Zhuk, Kyiv, Ukraine
A. A. Kirilenko, Kharkiv, Ukraine
O. I. Klesov, Kyiv, Ukraine
A. S. Korotkov, St. Petersburg, Russia
D. I. Lekhovyt'skiy, Kharkiv, Ukraine
P. N. Melezhiuk, Kharkiv, Ukraine
J. Modelski, Warsaw, Poland
V. I. Naidenko, Kyiv, Ukraine
Yu. Poplavko, Kyiv, Ukraine
I. N. Prudyus, L'viv, Ukraine
V. I. Slyusar, Kyiv, Ukraine
V. P. Taranenko, Kyiv, Ukraine
A. P. Trifonov, Voronezh, Russia
A. Cariow, Szczecin, Poland
P. Edenhofer, Bochum, Germany
Y. M. Yashchyshyn, Warsaw, Poland

Издатель: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр-т Победы 37, Киев, 03056, Украина. Тел. (+38 044) 236-79-89, web: <http://kpi.ua>.

Журнал издается с 1958 года.

© 2016, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Напечатано в Украине.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 г.
ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД

ИЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Том 59, № 7 (649)

Киев

Июль 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Вовк С. М. Общий подход к построению методов фильтрации на основе принципа минимума длительности	3
Лясота Д. В., Морозов В. М., Магро В. И. Распознавание проводящих объектов по характеристикам отраженной электромагнитной волны.	17
Гимпилевич Ю. Б., Савочкин Д. А. Имитационное моделирование измерительной информации, получаемой от RFID-меток в системах пространственной локализации объектов	26
Данова Т. Е., Перелыгин Б. В. Обоснование требований к длинам волн радиолокационного мониторинга в гидрометеорологических целях	37
Бора Дж., Шейк Т. А., Рой С. Компактная трехдиапазонная антенна с копланарным питанием и дефектной структурой экрана для GSM, WLAN и WiMAX	51

CONTENTS

Vovk, S. M. General Approach to Building the Methods of Filtering Based on the Minimum Duration Principle	3
Lyasota, D.; Morozov, V. M.; and Magro, V. I. Recognition of Conductive Objects Based on the Characteristics of Reflected Electromagnetic Wave	17
Gimpilevich, Yu. B.; and Savochkin, D. A. Simulation of Measuring Data Obtained from RFID-Tags in Systems of Spatial Localization of Objects.	26
Danova, T. E.; and Pereygin, B. V. Substantiation of Requirements to the Wavelength of Radar Monitoring for Hydrometeorological Purposes	37
Borah, Janmoni; Sheikh, Tasher Ali; and Roy, Sahadev Compact CPW-fed Tri-band Antenna with a Defected Ground Structure for GSM, WLAN and WiMAX Applications	51

Учредители:	Министерство образования и науки Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Регистрация:	Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете телевидения и радиовещания Украины Свидетельство КВ № 10692 от 01.12.2005 г.
Разрешение:	на распространение на территории Российской Федерации РП № 179 от 10.09.2009.

Над номером работали редакторы: Т. Н. Максимчук,
С. Н. Литвинцев

Подписано в печать 30.07.2016. Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 4,65. Усл. кр.-отт. 4,7. Уч.-изд. л. 5,22. Тираж 360 экз.
Заказ 07/2016.

Адрес редакции: 03056, г. Киев-56, проспект Победы, 37,
НТУУ «Киевский политехнический институт», редакция журнала
«Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника». Тел. +380-44-406-82-31, +380-44-454-90-41.
Интернет: www.radio.kpi.ua, e-mail: info@radio.kpi.ua

Набрано и отпечатано в редакции журнала
«Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника»

УДК 551.501.81

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ДЛИНАМ ВОЛН РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

ДАНОВА Т. Е., ПЕРЕЛЫГИН Б. В.

Одесский государственный экологический университет,
Украина, Одесса, 65016, ул. Львовская, 15

Аннотация. Представлен анализ распространения электромагнитных волн различной длины в облачной и безоблачной атмосфере. Показано ослабление радиоволн 0,8; 3,2; 5,6 и 10,0 см в облаках различных форм, разной водности и температуры. На основе повторяемости и интенсивности опасных явлений осуществлено районирование территории Украины. Проведено обоснование использования длин волн 0,8; 5,6 и 10,0 см для радиолокационного зондирования атмосферы в рамках климатического и синоптического мониторинга. Даны рекомендации по размещению радиолокационных станций различных частотных диапазонов для обеспечения потребностей в информационном продукте гражданской и ведомственной авиации.

Ключевые слова: радиолокационный мониторинг атмосферы; длины волн; радиолокационное поле

ВВЕДЕНИЕ

Многие наблюдения в атмосфере, относящиеся к глобальной системе наблюдения за климатом (ГСНК), проводятся в рамках уже существующих систем наблюдений. Основой системы получения информации о состоянии окружающей среды является наблюдательная сеть, включающая в себя в качестве одного из элементов наземную систему стационарных и подвижных пунктов наблюдений. Эта система совмещает в себе функции климатического (основа мониторинга климата) и синоптического (основа оперативного гидрометеорологического обеспечения) мониторинга [1, 2].

Наиболее четкие обязательства по размещению приборов и обмену сводками реализуются национальными метеорологическими службами на уровне приземной сети метеорологических станций и сети метеорологических радиолокационных станций [1]. В настоящее время в Украине есть несколько метеорологи-

ческих радиолокационных станций [3]. Совершенствование радиолокационных метеорологических наблюдений возможно только за счет построения единого радиолокационного поля. Оно обеспечит получение непрерывных как по пространству, так и по времени гидрометеорологических данных. При этом в качестве одной из первых должна быть решена задача выбора диапазонов волн для каждой метеорологической радиолокационной станции, входящей в сеть.

В различных странах, учитывая различный предлагаемый потребителю набор информационных продуктов, по-разному определялся наиболее эффективный рабочий диапазон волн метеорологических РЛС. Районирование территории Украины с целью выявления регионов с наибольшей повторяемостью опасных явлений погоды, связанных с формированием мощной конвективной облачности проведено в [4–8]. В зависимости от повторяемости опасных явлений погоды для минимизации

ущерба устанавливаются приоритетные задачи для метеорологических автоматических радиолокационных станций:

- климатические наблюдения (повторяемость и интенсивность опасных явлений на территории страны);

- учет социально-экономических факторов — распределение плотности населения и важнейших хозяйственных объектов по территории;

- выбор высоты уровня единого радиолокационного поля страны;

- основные принципы сбора и распространения информации.

АКТУАЛЬНОСТЬ

На протяжении многих лет проводились работы по разработке новых и усовершенствованию и модернизации существующих радиолокационных станций (РЛС) метеорологического назначения. Задаче выбора диапазона волн метеорологического радиолокатора посвящено большое количество исследований [9–16]. В большинстве этих работ рассматривался вопрос об оптимальной длине волны радиолокатора для обнаружения облачности и осадков. Благодаря этим работам в СССР появились двухволновые метеорологические РЛС (МРЛС) типа МРЛ-5, которые позволяют решать задачи градозащиты и штормового оповещения [17]. Однако со временем эти станции морально и физически устаревают и их количество сокращается.

Анализ современных исследований [18] показал, что лучшая точность измерения параметров дождя обеспечивается в Ка- и Х-диапазонах по сравнению с другими парами длин волн. В [19] сформулированы основные требования к доплеровским МРЛС, в том числе и к диапазону волн метеорологического радиолокатора на основе многокритериального анализа длительного опыта эксплуатации когерентно-импульсных радаров. Согласно рекомендациям всемирной метеорологической организа-

ции (ВМО) для зондирования атмосферы с целью гидрометеорологических исследований предлагается использовать радары с длиной волны ~6 см [19–21].

Использование радаров с длиной волны ~6 см позволяет обеспечить однородность получаемой радиолокационной информации при присоединении к глобальной сети наблюдений. Однако такое ограничение рабочей длины волны приводит к существенной потере информации, особенно, когда речь идет об индикации крупнокапельной части облака для целей сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений «Nowcasting». Также потеряна информация в Ка-диапазоне, в котором возможно обнаружение неустойчивого сдвига ветра при локальных конвективных процессах, являющихся опасными для авиации.

На фоне отсутствия в Украине собственной радиолокационной техники, позволяющей осуществлять полноценный мониторинг окружающей среды в метеорологических целях, задача разработки подобной техники стоит на одном из первых мест. Одним из основных этапов решения задачи является выбор диапазонов волн метеорологических радиолокаторов, которые составят единое радиолокационное поле. Поэтому целью данного исследования является определение подходов и решение задачи выбора диапазона волн МРЛС с учетом территориального распределения опасных явлений погоды.

Задача обоснования требований к диапазонам волн МРЛС, образующих радиолокационное поле радиолокационного мониторинга в гидрометеорологических целях для территории Украины, с ее специфическими метеорологическими и климатическими особенностями, ранее не рассматривалась.

ОБЪЕКТЫ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируются условия ослабления радиоволн различной длины в атмосфере (газы +

водяной пар) при нормальных условиях, в облаках различных форм при разной средней влажности и температуре, а также в жидких осадках в зависимости от интенсивности осадков.

Исходными материалами исследования являются характеристики атмосферы, облаков и осадков, а также пространственно-временное распределение опасных явлений погоды на территории Украины. В расчетах задействованы базы данных испанского климатического сайта <http://www.tutiempo.net/clima.htm> за период 1970–2012.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На примененном в работе теоретическом уровне исследования в качестве основного метода исследования использован анализ различных характеристик радиоволн при прохождении облаков и осадков. Для выявления пространственно-временных закономерностей развития мезомасштабных неоднородностей в исследованном регионе использована методика визуализации данных, полученных при статистической обработке исследуемого материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Известно, что облачная атмосфера представляет собой систему из множества взвешенных в воздухе или выпадающих пространственно распределенных гидрометеоров (капли, кристаллы, градины, снежинки, крупа). Из теории электромагнитного поля известно [22], что электромагнитные волны при распространении взаимодействуют со средой — происходит их ослабление и изменение скорости. Величина ослабления электромагнитных волн и скорость их распространения определяются электрофизическими свойствами среды.

При распространении электромагнитных волн в атмосфере их ослабление происходит за счет поглощения энергии газами атмосферы, а

также за счет поглощения и рассеяния энергии гидрометеорами. Ослабление радиоволн в радиолокации — явление отрицательное, т.к. снижает дальность действия РЛС. Вместе с тем в метеорологической радиолокации рассеяние электромагнитной энергии гидрометеорами в обратном направлении образует отраженный сигнал.

Уравнение радиолокации метеоцелей связывает среднюю мощность радиозеха с параметрами РЛС и отражающими свойствами метеообъектов. Один из вариантов уравнения радиолокации метеоцелей с учетом способа измерения мощности радиозеха имеет вид [17, 22]:

$$\frac{\bar{P}_r}{P_0} = \frac{P_r G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2}{7 \times 10^3 P_0 R^2} \eta \times 10^{-0,1\zeta}, \quad (1)$$

где P_r — мощность радиозеха [Вт], P_r — импульсная мощность передатчика [Вт], G — коэффициент усиления антенны, λ — длина волны [см], c — скорость света [см/с], τ — длительность импульса [с], θ — ширина диаграммы направленности антенны на излучение [радиан], P_0 — чувствительность приемного устройства [Вт], ζ — суммарное затухание в обе стороны [дБ], R — расстояние [см].

Известно, что появление высокого первого радиозеха зарождающихся облачных ячеек сопровождается резким ростом отражаемости, вертикальной протяженности и поперечных размеров облака. Отраженный от облака сигнал формируется совокупностью гидрометеоров и зависит от длины падающей волны и размера частиц и от их количества в единице объема. Характеристика метеоцелей, определяющая фактически водность облака, называется радиолокационной отражаемостью η [см⁻¹]:

$$\eta = \int_0^{\infty} N(D) \sigma_r(D, \lambda) dD, \quad (2)$$

где D — размер гидрометеоров, N — количество отражающих частиц в единице объема, σ_i — эффективная площадь рассеяния отдельного гидрометеора.

Таким образом, в случае работы МРЛС в системе штормоповещения и в системе обслуживания градозащиты, необходимо учитывать размеры и состояние исследуемых гидрометеоров — крупных капель и градин.

Зондирование облачной атмосферы показывает, что «взрывной», стремительный рост отраженного сигнала происходит в основном за счет роста переохлажденных капель в релейской области рассеяния. Для малых частиц, характерных для зарождающейся облачной ячейки ($D \ll \lambda$), справедливо выражение эффективной площади рассеяния σ_i [17, 22]:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D^6, \quad (3)$$

где множитель $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ для капель воды близок к единице, а для ледяных частиц равен 0,19. Условием «малости» частиц является соотношение:

$$\frac{\pi D}{\lambda} \leq 0,126, \quad (4)$$

где D — размер рассеивающих частиц.

Поскольку значения η града до $\sigma_i = 0,4$ отличаются от релейских незначительно, то резкий всплеск этой характеристики в момент появления первого радиоэха объясняется ростом частиц именно в релейской области рассеяния, когда отраженный сигнал пропорционален D^6 . Это справедливо в случае длины волны 3,2 см для частиц размером до 0,13 см. Для длины волны 10,0 см граничное значение мелких частиц составляет 0,42 см.

В дальнейшем, наиболее крупные капли замерзают, а образовавшиеся кристаллы ин-

тенсивно растут за счет переохлажденных капель, которые поступают с восходящим потоком и быстро замерзают на поверхности ледяных частиц. В дифракционной области рассеяния, когда размер рассеивающих частиц соизмерим с длиной волны и рассеяние ледяными частицами намного превышает рассеяние равновеликими сферами воды, отраженный сигнал пропорционален квадрату размера «крупной» частицы. В этой стадии развития ячейки отраженный сигнал продолжает расти, но не так быстро, как в стадии зарождения града.

Релеевское рассеяние на длинах волн 0,8; 3,2; 5,6 и 10,0 см, наиболее часто применяемых в метеорологии, справедливо для частиц диаметром до 0,036; 0,13; 0,23; 0,41 см соответственно. Таким образом, формула (3) применима для расчетов в мелкодисперсных системах (облака без осадков или мелкокапельный дождь). В области релейского рассеяния ледяная сфера начинает рассеивать значительно лучше даже при очень малой толщине пленки воды. На реальных градинах в режиме их таяния может удерживаться поверхностная пленка воды толщиной до 0,01 см, а в режиме мокрого роста града — до 0,1–0,2 см.

Экспериментальное измерение σ_i крупных переохлажденных сфер льда, подвешенных на шаре-пилоте, показывает, что в процессе их оттаивания в теплой части атмосферы значения σ_i могут уменьшаться в 10–100 раз, подтверждая теоретические выкладки [13]. Таким образом, ослабление обводненными градинами в значительной степени зависит от состояния поверхности градин.

Как отмечено ранее, поглощение радиоволн происходит в газах тропосферы, в частицах воды и льда облаков и в осадках. Коэффициент ослабления $\alpha_{осл}$ равен сумме коэффициентов ослабления в атмосферных газах (кислород и водяной пар) α_r , облаках $\alpha_{обл}$ и осадках $\alpha_{ос}$ [23]:

Таблица 1

λ , см	α_r , дБ/км
0,8	0,12
3,2	0,015
5,6	$9,5 \times 10^{-3}$
10	$7,5 \times 10^{-3}$

$$\alpha_{\text{осл}} = \alpha_r + \alpha_{\text{обл}} + \alpha_{\text{ос}} \text{ [дБ/км]}. \quad (5)$$

Для МРЛС с различными длинами волн известно погонное ослабление α_r радиоволн разной длины в атмосфере (газы + водяной пар) на уровне моря при давлении 10^{13} ГПа, при температуре 15 °С и концентрации паров воды $7,5 \text{ г/м}^3$ [23] (табл. 1).

При указанных значениях α_r уменьшение мощности сигнала в 2 раза (3 дБ) за счет воздействия только газов и паров воды произойдет на дальности: 25 км для длины волны 0,8 см; 200 км для длины волны 3,2 см; 316 км для длины волны 5,6 см и 400 км для длины волны 10 см. Полагаем эти значения дальностей дальностями половинного ослабления.

Облака без осадков состоят из сферических капель воды и кристаллов разной формы с поперечными размерами менее 200 мкм. При этих размерах для $\lambda > 0,8$ см всегда выполняются условия релеевского рассеяния. Ослабление радиоволн ввиду малости вклада общего рассеяния определяется поглощением. В жидкокапельных облаках ослабление прямо пропорционально их водности q и обратно пропорционально λ^2 [13]:

$$\alpha_{\text{обл жк}} = \frac{0,438q}{\lambda^2} f(t), \quad (6)$$

где $f(t)$ — функция, учитывающая влияние температуры.

Для кристаллических облаков зависимость от длины волны выражена более слабо:

$$\alpha_{\text{обл кр}} = 0,0024q / \lambda. \quad (7)$$

Как известно, облака не отличаются однородной структурой, внутри одного и того же облака возможно встретить участки с водностью, близкой к нулю. Для расчета коэффициентов ослабления радиоволн в облаках различных форм необходимо использовать среднюю водность [22]. Существует связь средней водности облака $\bar{q}$ с температурой t . В таблице 2 приведены значения $\alpha_{\text{обл}}$ радиоволн в слоисто-кучевых (Sc), слоистых (St), высоко-кучевых (Ac) и высоко-слоистых (As) облаках при различных средней водности $\bar{q}$ и температуре (строки, выделенные серым фоном). В других строках таблицы 2 приведены рассчитанные значения $\alpha_{\text{обл}}$ радиоволн для различных длин волн. Из таблицы 2 видно, что при $t = -15,0$ °С облака в основном состоят из кристаллов, при этом во всех других случаях относительная влажность в облаках $f(t) \approx 1$.

Анализ таблицы 2 показывает, что ослабление в облаках различных форм при $\lambda \geq 0,8$ см существенно в диапазоне температур $5,0 \dots -15,0$ °С, максимальные значения ($\alpha_{\text{обл}} = 22,58$ дБ/км) характерны для слоисто-дождевой облачности (Ns). Ослабление в кристаллических облаках примерно в 100 раз меньше, чем ослабление в жидкокапельных облаках той же водности. В этом случае, ослаблением в

Таблица 2

Параметры	$\alpha_{\text{обл}}, \text{дБ/км}$				
	$t = 5,0^\circ\text{C}$	$t = 0,0^\circ\text{C}$	$t = -5,0^\circ\text{C}$	$t = -10,0^\circ\text{C}$	$t = -15,0^\circ\text{C}$
$\bar{q}, \text{г/м}^3, \text{Ns}$	0,33	0,26	0,22	0,18	0,15
$\lambda \geq 0,8 \text{ см}$	22,58	17,79	15,06	12,32	0,45
$\lambda = 3,2 \text{ см}$	1,41	1,11	0,94	0,77	$1,35 \times 10^{-3}$
$\lambda = 5,6 \text{ см}$	0,46	0,36	0,31	0,25	$4,05 \times 10^{-6}$
$\lambda = 10,0 \text{ см}$	0,14	0,11	0,10	0,08	$1,22 \times 10^{-8}$
$\bar{q}, \text{г/м}^3, \text{Sc}$	0,27	0,24	0,21	0,17	0,14
$\lambda \geq 0,8 \text{ см}$	18,48	16,43	14,37	11,63	0,42
$\lambda = 3,2 \text{ см}$	1,15	1,03	0,90	0,73	$1,26 \times 10^{-3}$
$\lambda = 5,6 \text{ см}$	0,38	0,34	0,29	0,24	$3,78 \times 10^{-6}$
$\lambda = 10,0 \text{ см}$	0,12	0,11	0,09	0,07	$1,13 \times 10^{-8}$
$\bar{q}, \text{г/м}^3, \text{St}$	0,26	0,23	0,20	0,16	0,12
$\lambda \geq 0,8 \text{ см}$	17,79	15,74	13,69	10,95	0,36
$\lambda = 3,2 \text{ см}$	1,11	0,98	0,86	0,68	$1,08 \times 10^{-3}$
$\lambda = 5,6 \text{ см}$	0,36	0,32	0,28	0,22	$3,24 \times 10^{-6}$
$\lambda = 10,0 \text{ см}$	0,11	0,10	0,09	0,07	$9,72 \times 10^{-9}$
$\bar{q}, \text{г/м}^3, \text{Ac, As}$	0,21	0,20	0,18	0,16	0,12
$\lambda \geq 0,8 \text{ см}$	14,37	13,69	12,32	10,95	0,36
$\lambda = 3,2 \text{ см}$	0,90	0,86	0,77	0,68	$1,08 \times 10^{-3}$
$\lambda = 5,6 \text{ см}$	0,29	0,28	0,25	0,22	$3,24 \times 10^{-6}$
$\lambda = 10,0 \text{ см}$	0,09	0,09	0,08	0,07	$9,72 \times 10^{-9}$

сантиметровом диапазоне возможно пренебречь. На длинах волн, применяемых в градозащите ($\lambda \geq 3,2 \text{ см}$), возможно пренебречь ослаблением и в жидкокапельных облаках без осадков, т.к. даже при $\lambda = 3,2 \text{ см}$ оно не превышает 1,41 дБ/км.

Ослабление в осадках можно представить как функцию интенсивности осадков. Ослабление в сухом снеге мало, а в мокром снеге такое же, как и в осадках. В таблице 3 приведены значения $\alpha_{\text{ос}}$ радиоволн различной длины в жидких осадках в зависимости от интенсивности осадков. Анализ таблицы 3 показывает су-

Таблица 3

I , мм/ч	$\alpha_{ос}$, дБ/км			
	$\lambda = 0,8$ см	$\lambda = 3,2$ см	$\lambda = 5,6$ см	$\lambda = 10$ см
0,5	0,3	0,003	0,001	0,00015
1	0,45	0,007	0,002	0,0003
5	0,75	0,061	0,015	0,0015
10	2,0	0,151	0,033	0,003
50	8,5	1,25	0,215	0,015
100	15,0	3,08	0,481	0,03
200	—	7,65	1,08	0,06

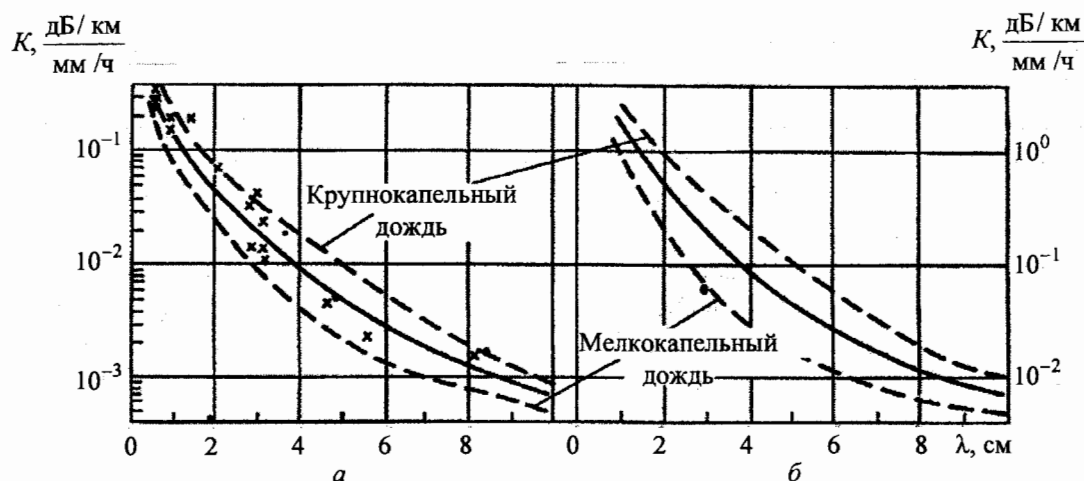


Рис. 1

ущественную зависимость ослабления электромагнитных волн в осадках от λ и интенсивности осадков I . При указанных значениях $\alpha_{ос}$ и при типовых для Украины интенсивностях дождя от 1 до 5 мм/ч, значения дальностей половинного ослабления за счет воздействия только жидких осадков составят соответственно: от 10 до 0,2 км для длины волны 0,8 см; от 428 до 49 км для длины волны 3,2 см; от 1500 до 200 км для длины волны 5,6 см и от 10000 до 2000 км для длины волны 10 см. Видно, что

чем короче длина волны, тем существенно меньше абсолютное значение дальности половинного ослабления.

В практике наблюдений удобно пользоваться единственным коэффициентом ослабления, характеризующим ослабление в дождях единичной интенсивности $I = 1$ мм/ч и протяженности $\Delta R = 1$ км. Зависимость единичного коэффициента ослабления от длины волны и его пределы вариации в зависимости от дисперсности капель дождя при интенсивности $I =$

1 мм/ч и водности $q = 1 \text{ г/м}^3$ представлены на рис. 1а, б, соответственно [23].

Из рис. 1 следует, что при одной и той же интенсивности дождя в зависимости от его дисперсности ослабление изменяется в 1,5–2,0 раза. Так, ослабление радиоволн при $\lambda = 10 \text{ см}$ в дождях примерно в 30–100 раз меньше, чем при $\lambda = 3,2 \text{ см}$.

При разной интенсивности осадков ($1 < I < 100 \text{ мм/ч}$) коэффициент ослабления в дождях изменяется в диапазонах $0,03 < K_{3,2} < 3,0 \text{ дБ/км}$ при $\lambda = 3,2 \text{ см}$, $0,0035 < K_{5,6} < 0,35 \text{ дБ/км}$ при $\lambda = 5,6 \text{ см}$, $0,0006 < K_{10} < 0,06 \text{ дБ/км}$ при $\lambda = 10,0 \text{ см}$. Анализ приведенных данных ослабления показывает, что эффективность применения МРЛС при работе в условиях воздействия атмосферных явлений может оказаться меньше идеальной, т.е. эффект ослабления существенно влияет на обнаружение облаков и осадков на удалении свыше 50 км, особенно при малых длинах волн, и мало влияет на обнаружение облаков и осадков при больших длинах волн.

Кроме того, проведенный анализ диапазонов волн, в котором должны работать МРЛС, входящие в радиолокационную государственную сеть, позволил определить основные черты, присущие наиболее часто используемым длинам волн.

Длина волны 0,8 см попадает в частотный сверхкороткий Ка-диапазон, использование которого ограничено из-за сильного поглощения водяным паром. Однако этот частотный диапазон позволяет получать более мощное радиоэхо при исследовании мелкодисперсных облаков и осадков.

Использование длины волны 3,2 см (Х-диапазон) в случае экранировки одной конвективной ячейки другими может привести к значительной погрешности в измерении величины отражаемости и к ошибкам при распознавании градовых ячеек. Кроме того, в области перехода от размеров дождевых капель к

размерам града (0,6–1,0 см) радиолокационная отражаемость мало зависит от размера частиц и определяется их концентрацией, поэтому градовые облака и интенсивные ливневые дожди имеют одинаковые значения отражаемости $\eta_{3,2}$, что снижает эффективность распознавания градовых облаков. Ослабление волн при $\lambda = 3,2 \text{ см}$ резко возрастает с увеличением диаметра гидрометеоров, ослабление тающим снегом или снегом с дождем может быть достаточно сильным на длинах волн $\lambda \leq 3,2 \text{ см}$.

На этом фоне, радиолокатор с длиной волны 5,6 см (С-диапазон) представляется хорошим компромиссом для радиолокаторов с длиной волны 3,2 см, т.к. в мелкодисперсных облаках и осадках ослабление значительно только на длинах волн $\lambda < 5,6 \text{ см}$.

При $\lambda = 10,0 \text{ см}$ ослабление радиоволн в осадках пренебрежимо мало. В то же время, значителен прирост отражаемости с изменением размера гидрометеоров в интервале перехода от размеров дождевых капель к характерным размерам градовых осадков.

Создание национальной метеорологической радиолокационной сети предусматривает полноценное исследование атмосферного пространства в рамках климатического и синоптического мониторинга, целью которого является оперативное гидрометеорологическое обеспечение [24, 25]. Постоянный радиолокационный мониторинг тропосферы над территорией страны представляется необходимым процессом, а своевременное предупреждение о стихийных явлениях погоды является обязательным для устойчивого развития экономики страны.

Для построения метеорологической радиолокационной сети необходимо четко представлять пространственно-временное распределение стихийных явлений погоды на территории страны. Стихийные метеорологические явления часто наблюдаются в комплексе (ливневые осадки теплого периода года сопровож-

даются грозами и градом и штормовым ветром, метели — снегопадами, сильным ветром, обледенениями), что значительно увеличивает ущерб от этих явлений.

Учитывая, что подчинение любой сети (наземных метеорологических станций и постов, аэрологических станций) происходит по принципу административного деления, целесообразно районирование опасных явлений погоды провести также с учетом административного деления страны. В данном исследовании использованы следующие опасные явления погоды:

- очень сильный дождь (выпадение осадков с количеством более 30 мм за 12 ч для горных районов и 50 мм для равнинной территории);

- очень сильный снегопад (количество осадков 20 мм и более за 12 ч и менее);

- крупный град (диаметр более 20 мм);

- гроза;

- шквал;

- туман (горизонтальная видимость 50 м и менее в течение 12 ч и более).

В Украине практически ежегодно наблюдаются опасные метеорологические явления, которые в отдельных случаях приобретают катастрофический характер и наносят ущерб сельскому и городскому хозяйству, населению.

В таблице 4 представлена повторяемость опасных явлений, определенная как число дней их появления в году в процентах, за период 1986–2005 и число дней с грозой и туманом за период 1970–2012. В таблице 4 серым фоном выделены значения, соответствующие максимуму исследуемого параметра.

Как показали исследования [5–8], очень сильные дожди на территории Украины отмечаются ежегодно. Чаще всего очень сильные дожди отмечаются в украинских Карпатах и на юге Одесской области (табл. 4). В Закарпатской и Ивано-Франковской областях наиболее часто отмечаются сильные снегопады.

Динамика опасных явлений погоды теплового полугодия связана с развитием конвективной облачности. Повторяемость гроз и града на территории Украины связана с восхождением воздушных потоков в горных районах, а также со стимулированием подъема влажного прогретого воздуха над акваториями причерноморских лиманов. Таким образом, градобитиям наиболее подвержена территория Одесской области, грозы чаще фиксируются в Одесской, Запорожской, Ивано-Франковской и Закарпатской областях.

Шквалы возникают в любых районах Украины, но чаще — в степной, лесостепной зоне и Полесье. В горных массивах Карпат, западных и северо-западных областях страны скорость ветра достигает 40 м/с. Шквалоопасная ситуация может возникнуть на всей территории Украины.

Из-за сложных условий образования пространственно-временное распределение тумана характеризуется значительной изменчивостью. Чаще всего туман возникает в горных районах украинских Карпат за счет орографического фактора: поднятие воздуха склонами, что приводит к его адиабатическому охлаждению.

За период 1986–2005 зафиксировано 149 случаев с сильным туманом. На территории Украины выделяется несколько типов годового хода тумана. На большей части страны максимум образования тумана приходится на зимние месяцы (декабрь–январь), а минимум — на весенние (апрель–май) и летние (июнь–август). Длительность периода с туманом зависит в первую очередь от мощности адвективных процессов. Сильный туман обычно удерживается в течение 10–20 ч. Наиболее туманоопасными являются Донецкая, Ивано-Франковская и Одесская области.

Проведенное районирование территории Украины по опасным явлениям погоды показало, что для большинства явлений территория Одесской, Запорожской областей и украин-

Таблица 4

Области Украины	Градации повторяемости опасных явлений					
	Очень сильный дождь, %	Очень сильный сне- гопад, %	Крупный град, %	Шквал, %	Число дней с грозой	Число дней с туманами
Винницкая	61–80	11–20	11–20	21–30	15–20	51–60
Волынская	61–80	≤ 10	11–20	31–40	15–20	41–50
Днепропетровская	61–80	21–30	21–30	> 40	21–25	51–60
Донецкая	81–100	11–20	≤ 10	21–30	15–20	> 60
Житомирская	≤ 60	≤ 10	11–20	31–40	15–20	31–40
Закарпатская	81–100	≥ 60	0	< 10	> 25	20–30
Запорожская	61–80	21–30	31–40	21–30	> 25	51–60
Ивано-Франковская	81–100	≥ 60	11–20	21–30	> 25	51–60
Киевская	81–100	21–30	11–20	> 40	21–25	41–50
Кировоградская	81–100	11–20	11–20	< 10	21–25	> 60
Луганская	≤ 60	11–20	≤ 10	11–20	21–25	31–40
Львовская	81–100	≤ 10	≤ 10	> 40	21–25	51–60
Николаевская	61–80	21–30	21–30	21–30	15–20	41–50
Одесская	81–100	21–30	≥ 40	> 40	> 25	> 60
Полтавская	≤ 60	≤ 10	≤ 10	11–20	15–20	51–60
Ровенская	≤ 60	≤ 10	0	21–30	15–20	31–40
Сумская	61–80	11–20	≤ 10	11–20	15–20	41–50
Тернопольская	81–100	11–20	21–30	11–20	15–20	41–50
Харьковская	61–80	21–30	11–20	31–40	21–25	41–50
Херсонская	61–80	≤ 10	21–30	21–30	15–20	41–50
Хмельницкая	81–100	11–20	21–30	> 40	21–25	41–50
Черкасская	61–80	21–30	11–20	31–40	15–20	41–50
Черниговская	≤ 60	11–20	11–20	11–20	< 15	41–50
Черновицкая	81–100	≤ 10	11–20	< 10	21–25	51–60

ских Карпат являются активными зонами. Мониторинг в различных районах страны необходимо осуществлять с помощью радиолокационных станций различных частотных диапазонов.

Для обеспечения потребностей в информационном продукте гражданской и ведомственной авиации необходимо оснастить все действующие аэропорты радиолокационными станциями с тремя длинами волн $\lambda = 0,8$ см (обнаружение кристаллических образований и сдвигов ветра в тропосфере над аэропортом), $\lambda = 5-6$ см (общее зондирование тропосферы) и $\lambda = 10,0$ см (локализация опасных конвективных явлений). Учитывая проведенное районирование опасных явлений погоды, в областях с наибольшей их повторяемостью рекомендуется устанавливать станции с двумя длинами волн: $\lambda = 5-6$ см и $\lambda = 10,0$ см. Остальную территорию страны достаточно оснастить станциями, работающими в автоматическом режиме с рабочей длиной волны $\lambda = 5-6$ см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для полноценного исследования атмосферного пространства в рамках климатического (основа мониторинга климата) и синоптического (основа оперативного гидрометеорологического обеспечения) мониторинга желательным является использование двух длин волн: $\lambda = 5-6$ см и $\lambda = 10,0$ см.

Первая длина волны ($\lambda = 5-6$ см) отвечает рекомендациям ВМО и обеспечивает однородность получаемой радиолокационной информации при присоединении к глобальной сети наблюдений. Это позволит проводить сравнительный анализ с результатами радиолокационных наблюдений других стран. Вторая длина волны ($\lambda = 10,0$ см) дает возможность обрабатывать быстротекущие и локальные конвективные процессы, имеющие катастрофические последствия.

В районах аэропортов желательно использование многофункциональных многодиапазонных радиолокационных станций с обязательной дополнительной длиной волны $\lambda = 0,8$ см для мониторинга всей толщи тропосферы на предмет обнаружения кристаллических облачных образований. Кроме того, такой радар может обнаруживать неустойчивый сдвиг ветра при локальных конвективных процессах, являющийся опасным для авиации.

Представленные исследования наряду с результатами районирования территории Украины позволяют приступить к разработке основ построения единого радиолокационного поля на исследуемой территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Towards an integrated global observing strategy: 1997 CEOS Yearbook / Committee on Earth Observation Satellites. European Space Agency. — Paris : Smith System Engineering Limited, 1997. — 145 p.
2. The Instruments and Methods of Observation Programme (IMOP) sets technical standards, quality control procedures and guidance for the use of meteorological instruments and observation methods in order to promote development documentation and world-wide standardization. — Дата доступа : 16.12. 2013. — Режим доступа : <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMOP-home.html>.
3. Поступление данных от метеолокаторов РОС-ГИДРОМЕТА, Украины и Белоруссии. — Режим доступа : <http://orm.mipt.ru:8000/radars>.
4. Техническая записка ВМО № 181 Использование радиолокаторов в метеорологии (ВМО № 625).
5. Данова Т. Е. Пространственно-временное распределение осадков на территории Украины в условиях современного изменения климата / Т. Е. Данова, Т. Л. Касаджик // Вісник ХНУ. Серія: Геологія. Географія. Екологія. — 2013. — № 38. — С. 101–109.
6. Логвинов К. Т. Опасные явления погоды на Украине / К. Т. Логвинов, В. Н. Бабиченко, М. Ю. Кулаковская. — Л. : Гидрометеиздат, 1972. — 236 с.
7. Данова Т. Е. Влияние современных климатических изменений на динамику мезомасштабных процессов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2013. — № 3. — С. 79–83.
8. Данова Т. Е. Повторяемость стихийных явлений погоды в районе Северного побережья Черного моря / Т. Е. Данова, Б. В. Перелыгин // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата : Вторая междунар. научн. конф. с эле-

ментами научной школы, 21–25 сентября 2015, Ставрополь, Россия : сб. тр. — Ставрополь : СКФУ, 2015. — С. 153–156.

9. *Hitschfeld W.* Effect of attenuation on the choice of wavelength for weather detection by radar / *W. Hitschfeld, J. S. Marshall* // *Proc. IRE.* — Jul. 1954. — Vol. 42, No. 7. — P. 1165–1168. — DOI : [10.1109/JRPROC.1954.274551](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1954.274551).

10. *Сальман Е. М.* К вопросу об оптимальной длине волны радиолокатора для обнаружения облачности осадков / *Е. М. Сальман* // *Тр. ГГО.* — 1960. — № 102. — С. 94–203.

11. *Абшаев М. Т.* О возможностях радиолокационного исследования микроструктуры облаков и осадков / *М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали* // *Тр. Высокоточного геофизического ин-та.* — 1966. — № 5. — С. 124–132.

12. *Сулаквелидзе Г. Л.* Измерение интенсивности осадков мультисекторным / *Г. Л. Сулаквелидзе, М. Т. Абшаев* // *Тр. Высокоточного геофизического ин-та.* — 1968. — № 11. — С. 198–214.

13. *Абшаев М. Т.* Об оптимальных длинах волн радиолокаторов метеорологического назначения / *М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали* // *Тр. Высокоточного геофизического ин-та.* — 1969. — № 14. — С. 199–214.

14. *Айвазян Г. М.* Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках / *Г. М. Айвазян.* — Л. : Гидрометеиздат, 1991. — 480 с.

15. Двухчастотное зондирование водяных капель эллипсоидальной формы / *А. Б. Веселовская, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов* // *Радиофизика и электроника.* — 2012. — Т. 3, № 4. — С. 37–43.

16. *Веселовская А. Б.* О точности расчета эффективной площади рассеяния несферических частиц жидких осадков в приближении дипольного рассеяния / *А. Б. Веселовская, Г. И. Хлопов* // *Радиоэлектроника.* — 2014. — Т. 57, № 5. — С. 3–12. — (Известия вузов). — Режим доступа : <http://radio.kpi.ua/article/view/S002134701405001X>.

17. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты / *М. Т. Абшаев, И. И. Бурцев, С. И. Ваксенбург, Г. Ф. Шевела.* — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 232 с.

18. *Линкова А. М.* Использование микроструктурных параметров для обработки данных двухчастотного измерения интенсивности дождя / *А. М. Линкова* // *Радиофизика и электроника.* — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 33–38.

19. *Advanced Weather Radar Systems 1993–1997 – Final Report* // *ESSEM COST Action 75.* — 2001. — ISBN/ISSN: 978–92–828–6712–9. — Дата доступа : 22.01.2015. — Режим доступа : http://www.cost.eu/domains_actions/essem/Actions/75.

20. Удосконалення методів побудови систем одержання та обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу навколишнього середовища // *Звіт про НДР № 0113U000164.* — Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2013, 2014.

21. Руководство по глобальной системе наблюдений ВМО-№ 488. — Издание 2010, обновлено в 2012. — 184 с.

22. *Степаненко В. Д.* Радиолокация в метеорологии / *В. Д. Степаненко.* — Л. : Гидрометеиздат, 1973. — 343 с.

23. Затухание в атмосферных газах. Рекомендации МСЭ-R P.676-6 Ассамблеи радиосвязи МСЭ (Вопрос МСЭ — R 201/3 1990–1992–1995–1997–1999–2001–2005). — Дата доступа : 16.12.2013. — Режим доступа : http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-p.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf.

24. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / *Т. А. Базлова, Н. В. Бочарников, Г. Б. Брылев [и др.]; под ред. Г. Б. Брылева.* — С.П.-б. : Гидрометеиздат, 2002. — 332 с.

25. IPCC. 2007. Climate change. 2007 : The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers. — Cambridge–New York : Cambridge University Press, 2007. — 996 p.

Поступила в редакцию 24.01.2014

После переработки 14.11.2015

INFORMATION ON THE ARTICLE

SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO THE WAVELENGTH OF RADAR MONITORING FOR HYDROMETEOROLOGICAL PURPOSES

Tatiana E. Danova, ORCID: 0000-0002-9660-8971, danova8@mail.ru, Odessa State Environmental University, Ukraine

Boris V. Pereygin, satel@odeku.edu.ua, Odessa State Environmental University, Ukraine

Analysis of electromagnetic waves propagation of various wavelengths in the cloudy and cloudless atmosphere is presented. Attenuation of 0.8, 3.2, 5.6 and 10.0 cm radio waves in the clouds of various forms, different water content and temperatures is demonstrated. Based on the frequency and intensity of the hazards, zoning of Ukraine territory has been carried out. We have performed the substantiation of utilization of 0.8, 5.6, and 10.0 cm wavelengths for radar sounding of the atmosphere in the context of the climate and synoptic monitoring. The recommendations are given on the placement of radar stations of different frequency bands in order to meet the needs for information product of the civil and departmental aviation

Keywords: radar monitoring of the atmosphere; wavelengths; attenuation, radar field

REFERENCES

1. Towards an integrated global observing strategy: 1997 CEOS Yearbook. Committee on Earth Observation Satellites. European Space Agency. Paris: Smith System Engineering Limited, 1997, 145 p.
2. The Instruments and Methods of Observation Programme (IMOP) sets technical standards, quality control procedures and guidance for the use of meteorological instruments and observation methods in order to promote development documentation and world-wide standardization, <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMOP-home.html>.
3. Data reception from weather radars of ROSHYDROMET, Ukraine and Belarus, <http://orm.mipt.ru:8000/radars>.
4. GIFT, G.A. Use of radar in meteorology. WMO No. 625, (Technical Note No. 181), 1985.
5. DANOVA, T.E.; KASADZHIK, T.L. Spatial-temporal distribution of precipitations in the territory of Ukraine under the conditions of modern climate change. *Visnyk V. N. Karazin Kharkiv National University, Ser. Geology, Geography, Ecology*, 2013, n.38, p.101-109.
6. LOGVINOV, K.T.; BABICHENKO, V.N.; KULAKOVSKAYA, M.Y. *Hazardous Weather Phenomena in Ukraine*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972 [in Russian].
7. DANOVA, T.E. Influence of modern climatic changes on the dynamics of processes of mezzo scale. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Severo-Kavkazskiy Region. Estestvennye Nauki*, 2013, n.3, p.79-83.
8. DANOVA, T.E.; PERELYGIN, B.V. Frequency of natural weather phenomena in the region of the North coast of the Black Sea. *Proc. of the 2-nd Int. Sci. Conf. with elements of scientific school on Innovative Methods and Research Tools in the Area of Atmospheric Physics, Hydrometeorology, Ecology and Climate Change*, 21-25 Sept. 2015, Stavropol, Russia. Stavropol: SKFU, 2015, p.153-156.
9. HITSCHFELD, W.; MARSHALL, J.S. Effect of attenuation on the choice of wavelength for weather detection by radar. *Proc. IRE*, Jul. 1954, v.42, n.7, p.1165-1168, DOI: [10.1109/JRPROC.1954.274551](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1954.274551).
10. SALMAN, E.M. To the problem of optimal wavelength of the radar for the detection of precipitations clouds. *Tr. GGO*, 1960, n.102, p.94-203.
11. ABSHAEV, M.T.; DADALI, Y.A. On the possibilities of radar examination of the microstructure of clouds and precipitations. *Tr. Vysokogornogo Geofizicheskogo Instituta*, 1966, n.5, p.124-132.
12. SULAKVELIDZE, G.L.; ABSHAEV, M.T. Measurement of the precipitation intensity using multi-radar. *Tr. Vysokogornogo Geofizicheskogo Instituta*, 1968, n.11, p.198-214.
13. ABSHAEV, M.T.; DADALI, Y.A. On the optimal wavelengths of radars of the meteorological application. *Tr. Vysokogornogo Geofizicheskogo Instituta*, 1969, n.14, p.199-214.
14. AYVAZYAN, G.M. *Propagation of Millimeter and Submillimeter Waves in the Clouds*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991 [in Russian].
15. VESELOVSKA, A.B.; VOYTOVICH, O.A.; LINKOVA, A.M.; KHLOPOV, G.I. Dual-frequency sensing of water drops of ellipsoidal form. *Telecom. Radio Eng.*, 2013, v.73, n.13, p.1153-1163, DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v73.i13.30](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i13.30).
16. VESELOVSKA, G.B.; KHLOPOV, G.I. On scattering cross-section calculation accuracy of nonspherical particles of rain precipitation using the dipole scattering approximation. *Radioelectron. Commun. Syst.*, 2014, v.57, n.5, p.189-196, DOI: [10.3103/S073527271405001X](https://doi.org/10.3103/S073527271405001X).
17. ABSHAEV, M.T.; BURTSEV, I.I.; VAKSENBURG, S.I.; SHEVELA, G.F. *Guidance on the Utilization of Radars MRL-4, MRL-5, MRL-6 in the Hail Protection System*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980 [in Russian].
18. LINKOVA, A.M. Use of microstructure parameters for data processing of double frequency measurement of rain intensity. *Telecom. Radio Eng.*, 2012, v.71, n.5, p.423-433, DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v71.i5.40](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i5.40).
19. Advanced Weather Radar Systems 1993-1997. Final Report. ESSEM COST Action 75 (2001), ISBN/ISSN: 978-92-828-6712-9, http://www.cost.eu/domains_actions/ess-em/Actions/75.
20. Report of research work No. 0113U000164. The improvement of development techniques of obtaining and processing of measurement information for the monitoring of

environment: scientific technical report. Odesa: Odesa State Ecological University, 2013, 2014.

21. Guidance for the Global Observing System WMO-No 488. 2010 ed., updated in 2012, 184 p.

22. STEPANENKO, V.D. *Radiolocation in Meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973 [in Russian].

23. Attenuation in atmospheric gases. Recommendations ITU-R P.676-6 The ITU Radiocommunication Assembly (Question ITU – R 201/3 1990-1992-1995-1997-1999-

2001-2005), http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-p.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf.

24. BAZLOVA, T.A.; BOCHARNIKOV, N.V.; BRYLEV, G.B. ET AL. *Meteorological Automated Radar Networks*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002 [in Russian, ed. by G. B. Brylev].

25. IPCC 2007. Climate change. 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers. Cambridge–New York: Cambridge University Press, 2007, 996 p.

Received in final form November 11, 2015