

## **К вопросу об учете облачных ресурсов в задачах распространения радиоволн в тропосфере**

А.П.Доронин<sup>1</sup>, Н.А.Козлова<sup>1</sup>, В.М.Петроченко<sup>1</sup>, Г.Г.Щукин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

E-mail: [yka@mil.ru](mailto:yka@mil.ru).

<sup>2</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, Муром, Владимирская область, ул. Орловская, д.23.

E-mail: [oid@mivlgu.ru](mailto:oid@mivlgu.ru)

*В статье на примере северного района Европейской территории России выполнено оценивание облачных ресурсов в естественных условиях и при модифицировании облаков различных форм в задачах распространения радиоволн в тропосфере.*

*Ключевые слова: радиоволны, тропосфера, облака, туманы, осадки.*

## **On the issue of accounting for cloud resources in the problems of radio wave propagation in the troposphere**

A.P. Doronin<sup>1</sup>, N.A. Kozlova<sup>1</sup>, V.M. Petrochenko<sup>1</sup>, G.G. Shchukin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Mozhaisky Military Space Academy.*

<sup>2</sup> *Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov.*

*The article uses the example of the northern region of the European territory of Russia to evaluate cloud resources in natural conditions and when modifying clouds of various forms in the problems of radio wave propagation in the troposphere.*

*Keywords: radio waves, troposphere, clouds, fogs, precipitation.*

### **Введение**

Радиоволны, как и высокочастотные электромагнитные волны, возбуждаемые переменным электрическим током в специальных технических устройствах (генераторах), передают на расстояния сигналы, звуки, изображения, т.е. с их помощью осуществляются радиосвязь, радиолокация, радиовещание, телевидение.

Согласно [1], различают радиоволны: длинные километровые (длиной больше 3 км и частотой ниже 100 кГц); длинные радиовещательные (длиной от 1000 до 3000 м и частотой от 300 до 100 кГц), средние (длиной от 200 до 1000 м и частотой от 1500 до 300 кГц), также широко применяемые для радиовещания; промежуточные и короткие (длиной от 10 до 200 м и частотой от 30 до 1,5 МГц); ультракороткие – метровые, сантиметровые и миллиметровые, служащие для радиолокации и телевидения. Сантиметровые и миллиметровые волны называют еще микроволнами.

Установлено, что на распространение радиоволн оказывает влияние среда, в которой они распространяются. Для большей части технических областей применения радиоволн их естественной средой распространения является атмосфера Земли, разделенная на несколько слоев: тропосфера (до 10...15 км), стратосфера (15...80 км), ионосфера (80...1000 км). Несмотря на сравнительно небольшой слой, по сравнению со

всей атмосферой, тропосфера для распространения радиоволн (и, в частности, микроволн) имеет большое значение, что объясняется следующими факторами [2]:

во-первых, в тропосфере сосредоточена масса всей атмосферы (около 80%) и почти вся масса водяных паров;

во-вторых, в тропосфере могут наблюдаться различного рода гидрометеоры (туман, дождь, снег, град) и облака, а также частицы различного происхождения (частицы пыли, продукты извержения вулканов и др.);

в-третьих, на современном этапе представляется возможным с помощью определенных методов и средств модифицировать (видоизменять) как микрофизику облаков (фазовое состояние, размеры и концентрации капель и частиц льда), так и их геометрические характеристики (вертикальная протяженность, высоты нижней и верхней границ), а также количество облаков за счет их рассеяния.

Последние два обстоятельства указывают на необходимость детального исследования облаков различных форм в конкретных физико-географических районах России. В данной работе в качестве примера рассмотрен северный район Европейской территории России (ЕТР).

Исходя из этого, целью настоящей статьи является оценивание облачных ресурсов над выбранным районом в естественных условиях и при модифицировании облаков в задачах распространения радиоволн в тропосфере.

### **Оценивание облачных ресурсов над северным районом Европейской территории России в задачах распространения радиоволн в тропосфере**

Установленный к настоящему времени факт ослабления радиоволн (в частности, сантиметрового и миллиметрового диапазона – микроволн) осадками, облаками, туманами [2-6], а также факт их модифицирования [7] обуславливает необходимость по-новому подойти к классификации атмосферных облачных образований с учетом ее применимости к проблеме распространения радиоволн в тропосфере. С учетом данного обстоятельства в работе представлены результаты выполненного в этом направлении исследования, позволяющие сделать следующие выводы:

во-первых, поскольку, согласно [2-6, 8], наиболее сильное ослабление микроволн происходит в облаках, содержащих жидкокапельную фазу, возникает необходимость детального исследования облаков различных форм в конкретных ФГР России с точки зрения их фазового состояния в течение месяцев, сезонов, полугодий;

во-вторых, облака верхнего яруса (перистые (Ci), перисто-кучевые (Cc), перисто-слоистые (Cs)) в силу того, что они являются кристаллическими, не будут являться серьезным препятствием для прохождения микроволн [2, 4, 9];

в-третьих, интерес с точки зрения модифицирования облаков различных форм будут представлять следующие из них: высококучевые (Ac), высокослоистые (As), слоисто-дождевые (Ns), слоистые (St), слоисто-кучевые (Sc), кучевые (Cu) и кучево-дождевые (Cb) облака.

С учетом вышеизложенного, в настоящей работе в качестве исследуемого района выбран северный район ЕТР, а основным материалом для исследования характеристик облаков явились протоколы самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7 м (свыше трех тысяч подъемов самолетов-зондировщиков) над Архангельском за период 1953 – 1964 гг.

Исследование характеристик облаков различных форм в конкретном физико-географическом районе обычно начинается с получения данных об их повторяемости. Так, полученные в работе такие данные применительно к северному району ЕТР позволяют заключить, что над выбранным районом преобладающими формами облаков являются облака нижнего яруса, а именно, слоистые и слоисто-кучевые. На их

повторяемость в холодное полугодие приходится 36,1%, в теплое – 23,2 %. Вследствие этого, облака этих форм, наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с высококучевыми (Ac) облаками, могут быть одним из объектов исследования.

Другими формами облаков, представляющими интерес для исследования над рассматриваемым районом в течение года, могут быть фронтальные облака – слоисто-дождевые (Ns) и высоко-слоистые (As). Так, на повторяемость Ns облаков в холодное полугодие приходится 37,0 %, в теплое – 19,6 %, а на As облаков – около 13-14 % в течение года.

Для распространения радиоволн в тропосфере необходимы также сведения не только о повторяемости облаков различных форм в конкретном физико-географическом районе, но и об их расслоенности и фазовой структуре. С учетом этого в работе приводятся результаты исследования расслоенности волнистообразных (St и Sc) облаков.

Установлено, что слоистые и слоисто-кучевые облака в течение года над северным районом ЕТР являются однослойными: на их повторяемость приходится более 85 %. На повторяемость двухслойных St и Sc облаков приходится в течение года не более 14 %, а трех- и четырехслойные облака этих форм почти не наблюдаются.

Данные о расслоенности фронтальных слоистообразных облаков (слоисто-дождевых и высокослоистых) для данного района ЕТР позволяют сделать вывод о том, что для них общим является то, что на фронтах преобладают облака с числом слоев не более трех. На повторяемость фронтальных слоистообразных облаков с осадками с таким числом слоев в течение года над северным районом ЕТР приходится 98,7 %, без осадков – 96,7 %.

В задачах распространения радиоволн в тропосфере с наличием облаков особую важность приобретают данные об их фазовой структуре. Это связано с тем обстоятельством, что именно фазовая структура облаков во многом определяет вид возможных осадков (жидких, кристаллических) или смешанных (например, мокрый снег).

В силу этого в табл. 1 представлены результаты исследования фазовой структуры волнистообразных облаков над северным районом ЕТР по сезонам и полугодиям.

Как следует из данных в табл. 1 в течение года наблюдается преобладание жидкокапельной фазы в волнистообразных St-Sc облаках. При этом видно, что повторяемость капельной фазы увеличивается от зимы к лету, что закономерно связано с повышением температуры в этот период. Отметим, что, согласно приведенным выше данным, волнистообразные облака могут быть не только капельными, но и смешанными, особенно в месяцы холодного полугодия. Над северным районом ЕТР наибольшие значения повторяемости St-Sc облаков со смешанной фазовой структурой наблюдаются в период ноябрь-март (от 40,1% до 48,5%). В другие месяцы года на повторяемость облаков со смешанной фазой приходится не более 10-20%.

**Таблица 1. Повторяемость (%) фазового состояния волнистообразных (St-Sc) облаков над Архангельском**

Фазовое состояние	Сезон				Полугодие	
	зима	весна	лето	осень	холодное	теплое
Капельное	60,3	68,3	96,2	80,4	64,5	92,4
Смешанное	38,7	31,1	3,8	19,4	34,6	7,6
Кристаллическое	1,0	0,6	–	0,2	0,9	–
Число случаев	375	225	237	408	772	473

Полностью кристаллические St-Sc облака для данного района встречаются крайне редко, не чаще, чем в 2% случаев.

Полученные результаты исследования фазового состояния фронтальных слоистообразных облаков, приведенные в табл. 2, указывают на то, что эти облака имеют сложную фазовую структуру (выделено девять типов распределения фаз в облаках). В большей степени это справедливо для Ns и As облаков, а также для облачных систем Ns-As.

**Таблица 2. Повторяемость (%) фазового состояния фронтальных слоистообразных облаков над Архангельском**

Тип облаков	Фазовое состояние облаков	Холодное полугодие		Теплое полугодие	
		Ns, Ns-As	As	Ns, Ns-As	As
I	Капельное	18,5	3,1	40,0	27,0
		43,8	4,8	68,7	15,1
II	Капельное до $H_1$ , выше – смешанное	6,7	0,9	27,0	8,1
		5,0	1,1	9,8	4,0
III	Капельное до $H_1$ , выше – кристаллическое	–	–	0,7	2,7
		–	–	–	–
IV	Смешанное	61,0	63,9	21,7	48,7
		44,0	62,4	16,1	56,6
V	Смешанное до $H_1$ , выше – капельное	–	–	–	–
		–	–	–	–
VI	Смешанное до $H_1$ , выше – кристаллическое	8,0	4,8	2,0	2,7
		2,2	4,2	2,7	5,6
VII	Кристаллическое	4,7	26,9	2,0	5,4
		5,0	27,5	2,7	17,7
VIII	Кристаллическое до $H_1$ , выше – смешанное	1,1	0,4	–	5,4
		–	–	–	1,0
IX	Капельное до $H_1$ , выше до $H_1$ – смешанное, выше – кристаллическое	–	–	6,6	–
		–	–	–	–
Число случаев		464	227	152	37
		179	189	112	198

*Примечание: в числителе приведены данные, относящиеся к фазовому состоянию фронтальных слоистообразных облаков с осадками, в знаменателе – без осадков.*

Наряду с данными о фазовой структуре облаков, определяющей во многом вид выпадающих из них осадков (в виде капель или частиц льда (снега)), для оценивания условий распространения радиоволн в тропосфере важное значение имеют сведения о влажности и водозапасах облаков различных форм. Исходя из этого, в табл. 3-5 представлены данные о средних значениях влажности волнистообразных и слоистообразных облаков.

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

во-первых, средние значения влажности как волнистообразных (St, Sc), так и слоистообразных (Ns, Ns-As) облаков отличаются по сезонам незначительно, находясь в пределах 0,19-0,32 г/м<sup>3</sup>;

во-вторых, значения влажности как в волнистообразных (St, Sc), так и в слоистообразных (Ns, NS-As) облаков характеризуются возрастанием их значений от

зимы к лету, что объясняется увеличением температуры воздуха от холодного к теплому полугодью;

в-третьих, водозапасы волнистообразных облаков (St, Sc) в течение года не превышают, как правило, значений  $100 \text{ г/м}^2$  ( $68\text{-}92 \text{ г/м}^2$  в зависимости от сезона). Значения водозапаса этих облаков (также, как и значения влажности в них) имеют тенденцию к их возрастанию в основном от холодного полугодия к теплому;

в-четвертых, значения водозапаса слоистообразных облаков (Ns, Ns-As) значительно превышают значения водозапаса волнистообразных облаков и составляют сотни  $\text{г/м}^2$  (от  $142 \text{ г/м}^2$  зимой до  $279 \text{ г/м}^2$  летом для слоисто-дождевых облаков и от  $117 \text{ г/м}^2$  весной до  $869 \text{ г/м}^2$  летом для системы Ns-As облаков). Повышенные значения водозапаса в слоистообразных облаках объясняются их значительной вертикальной протяженностью.

**Таблица 3. Средние значения влажности ( $\text{г/м}^3$ ) (числитель) и водозапаса ( $\text{г/м}^2$ ) (знаменатель) волнистообразных (St-Sc) облаков**

Пункт	Зима	Число случаев	Весна	Число случаев	Лето	Число случаев	Осень	Число случаев
Архангельск	$\frac{0,19}{78,5}$	$\frac{140}{75}$	$\frac{0,20}{67,7}$	$\frac{136}{78}$	$\frac{0,25}{92,0}$	$\frac{156}{97}$	$\frac{0,24}{86,5}$	$\frac{298}{178}$

**Таблица 4. Средние значения влажности ( $\text{г/м}^3$ ) Ns (числитель) и Ns-As (знаменатель) облаков**

Пункт	Зима	Число случаев	Весна	Число случаев	Лето	Число случаев	Осень	Число случаев
Архангельск	$\frac{0,19}{0,12}$	$\frac{232}{44}$	$\frac{0,20}{0,18}$	$\frac{1152}{86}$	$\frac{0,32}{0,24}$	$\frac{70}{76}$	$\frac{0,25}{0,27}$	$\frac{236}{80}$

**Таблица 5. Средние значения водозапаса ( $\text{г/м}^2$ ) Ns (числитель) и Ns-As (знаменатель) облаков**

Пункт	Зима	Число случаев	Весна	Число случаев	Лето	Число случаев	Осень	Число случаев
Архангельск	$\frac{142,0}{544,0}$	$\frac{112}{20}$	$\frac{181,0}{117,0}$	$\frac{67}{22}$	$\frac{279,0}{869,0}$	$\frac{32}{23}$	$\frac{196,0}{774,0}$	$\frac{109}{24}$

Приведенные в работе данные о влажности и водозапасах волнистообразных и слоистообразных облаков над северным районом ЕТР могут быть использованы при расчете дальности распределения радиоволн (и, в частности, микроволн) в тропосфере.

Применительно к оцениванию возможности изменения микрофизических и геометрических характеристик облаков различных форм над рассматриваемым районом путем применения средств модифицирования с определенной целью (например, рассеяние облаков или изменение их фазового состояния, т.е. перевод их из капельного в кристаллическое состояние) в табл. 6 приведены данные о вертикальной протяженности облаков.

Заметим, что пригодными к рассеянию считались переохлажденные слоистообразные и волнистообразные облака капельного и смешанного строения с вертикальной протяженностью не более  $1000 \text{ м}$ . При этом средняя температура облачного слоя должна быть не выше  $3^\circ\text{C}$  [10].

**Таблица 6. Средние значения вертикальной протяженности (км) волнистообразных и слоистообразных облаков (без осадков) (г. Архангельск)**

Виды облаков	Сезон				Полугодие	
	зима	весна	лето	осень	холодное	теплое
Волнистообразные	0,47	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Слоистообразные	0,72	0,68	1,24	0,98	0,72	1,24

Можно видеть, что волнистообразные облака являются пригодными к рассеянию по значению толщины облаков в течение всего года, а фронтальные слоистообразные облака (без осадков) – зимой, весной и осенью.

Наряду с приведенными в настоящей работе характеристиками волнистообразных и слоистообразных облаков в табл. 7 приведены количественные оценки пригодных к рассеянию облаков указанных выше форм над северным районом ЕТР.

**Таблица 7. Оценки пригодности (%) к рассеянию переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков (г.Архангельск)**

Виды облаков	Сезон				Полугодие	
	зима	весна	лето	осень	холодное	теплое
Волнистообразные	93,9	75,5	12,0	57,6	84,5	29,5
Слоистообразные (без осадков)	50	28,7	9,4	21,4	37,7	16,3

Из анализа представленных в табл. 7 данных можно сделать вывод о том, что наиболее благоприятные условия для рассеяния переохлажденных волнистообразных (St, Sc) облаков наблюдаются в холодное полугодие (84,5%) с максимумом повторяемости, приходящимся на февраль. Зимой оценки пригодности таких облаков к рассеянию самые высокие (93,9%). Летом из-за повышения температуры воздуха они существенно снижаются (не более 12%). Вместе с тем, в переходные сезоны года оценки пригодности к рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков достаточно высоки (75,5% весной и 57,6% осенью). Такие оценки можно объяснить сезонным ходом распределения температуры воздуха.

По сравнению с волнистообразными облаками оценки пригодности к рассеянию переохлажденных фронтальных слоистообразных облаков гораздо ниже и не превышают, даже зимой, 50%. Это объясняется их фазовым состоянием и вертикальной протяженностью.

### **Выводы**

1. Получены данные об относительной повторяемости сплошной облачности различных форм над северным районом ЕТР, а также сведения о расслоенности, фазовой структуре и вертикальной протяженности волнистообразных (слоистых и слоисто-кучевых) и слоистообразных (слоисто-дождевых и высокослоистых) облаков и количественные оценки их пригодности к рассеянию.

Установлено, что на повторяемость волнистообразных (St, Sc) облаков в холодное полугодие приходится 36,1%, в теплое – 23,2%. Повторяемость фронтальных Ns облаков в холодное полугодие составляет 37,0%, в теплое – 19,6% соответственно. На повторяемость высокослоистых облаков приходится около 13-14% в течение года.

Показано, что волнистообразные облака (St, Sc) в течение года являются в основном однослойными (86-89%) и жидкокапельными (от 60,3% зимой до 96,2% летом). Фронтальные слоистообразные облака, напротив, являются расслоенными (как

правило, трехслойными) и имеют сложную фазовую структуру (выделено 9 типов распределения фазовой структуры Ns, As и систем Ns-As облаков).

2. Выявлено, что наиболее часто пригодные к рассеянию переохлажденные волнистообразные облака над северным районом ЕТР наблюдаются в месяцы холодного полугодия (84,5%). Зимой оценки пригодности к рассеянию таких облаков самые высокие (93,9%), летом – самые низкие (12,0%). В переходные сезоны они изменяются от 57,6% осенью до 75,5% весной.

Переохлажденные фронтальные слоистообразные облака (без осадков) пригодны к рассеянию в основном зимой (не более 50%). В другие сезоны оценки таких облаков к рассеянию составляют: весной – 28,7%, летом – 9,4% и осенью – 21,4%, что объясняется значительной вертикальной протяженностью и фазовой структурой этих облаков.

3. Полученные в работе характеристики волнистообразных и слоистообразных облаков над северным районом ЕТР могут быть, по мнению авторов статьи, полезными при планировании, подготовке и проведении работ по исследованию распространения радиоволн в тропосфере с облаками различных форм. Кроме того, они могут явиться эталонными значениями для калибровки результатов исследования характеристик облаков с помощью разрабатываемых радиолокационных методов и средств исследования природных объектов.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)*

### **Литература**

1. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
2. Кубанов В.П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с.
3. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
4. Черный В.В. Влияние факторов природной среды на применение космических систем. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2005. – 222 с.
5. Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации// Радиотехника и электроника, 2016, том 61, № 10, С. 927-939.
6. Шукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. – Муром, 2009. – 166 с.
7. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012.-342 с.
8. Васищева М.А., Шукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. – Обнинск, 1976. – 93 с.
9. Облака и облачная атмосфера. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
10. Половина И.П. РЛ.: Гидрометеиздат, 1980. – 213 с.