

К вопросу об изменении условий распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере

А.П. Доронин¹, Н.А. Козлова¹, В.М. Петроченко¹, Г.Г. Щукин^{1,2}

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

E-mail: vka@mil.ru.

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

E-mail: mivlgu.ru.

Рассматриваются основные пути изменения условий прохождения радиоволн в тропосфере и ионосфере за счет применения средств модифицирования, позволяющих видоизменять характеристики облаков различных форм в слое от земной поверхности до тропопаузы в первом и регулировать концентрацию заряженных частиц во втором случаях.

Ключевые слова: радиоволны, микроволны, облака, туманы, заряженные частицы, химические реагенты, тропосфера, ионосфера.

On the issue of changing the conditions of propagation of radio waves in the troposphere and ionosphere

A.P. Doronin¹, N.A. Kozlova¹, V.M. Petrochenko¹, G.G. Shchukin^{1,2}

¹ *Mozhaisky Military Space Academy.*

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

The article discusses the main ways to change the conditions for the passage of radio waves in the troposphere and ionosphere through the use of modification tools that allow modifying the characteristics of clouds of various shapes in the layer from the Earth's surface to the tropopause in the first case and to regulate the concentration of charged particles in the second cases.

Keywords: radio waves, microwaves, clouds, fogs, charged particles, chemical reagents, troposphere, ionosphere.

Введение

Известно, что радиолокационные методы исследования природных сред широко применяются в различных областях жизнедеятельности человека: телевидение, связь, радиовещание, метеорология, экология и др. [1-3].

Согласно [4], 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.

К настоящему времени достоверно 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. В связи с этим представляется важным рассмотреть вопрос, связанный с классификацией атмосферы по различным признакам.

Согласно метеорологическому словарю Хромова И.П. и Мамонтова Л.И. [4], атмосфера – это воздушная оболочка Земли, принимающая участие в ее суточном и годовом вращении; предмет изучения метеорологии.

В вертикальном направлении атмосферу разделяют на ряд основных слоев. По распределению температуры с высотой выделяются следующие основные слои: тропосфера (до 9 – 17 км), стратосфера (до 50 – 55 км), мезосфера (до 80 – 85 км), термосфера (выше 85 км).

По физико-химическим процессам выделяются: озоносфера (10 – 50 км), нейтросфера (от поверхности Земли до 70 – 80 км), ионосфера (выше 70 – 80 км), хемосфера (от стратосферы до нижней части термосферы).

По кинетическим процессам выделяют экзосферу (выше 600 – 1000 км) и земную корону (от 2 до 20 тыс. км).

По газовому составу различают гомосферу (до 90 – 100 км) и гетеросферу (выше 90 – 100 км).

Переходные слои или границы между основными атмосферными слоями носят название пауз: тропопауза, стратопауза, мезопауза.

Область атмосферы между поверхностью Земли и уровнем, расположенным приблизительно на высоте 10 км (на экваторе 15 – 17 км), называется нижней атмосферой; Она характеризуется убыванием температуры с высотой.

Область, находящаяся выше (до 100 км), называется средней атмосферой. Эта область гораздо более чувствительна к воздействию внешних факторов – таких, как: изменение солнечной активности, выброс каких-либо веществ на некоторой высоте или на поверхности Земли.

Выше 100 км начинается диффузионное разделение газовых составляющих атмосферы. Эта область называется верхней атмосферой. Ее структура и динамика существенно определяются неравновесными в термодинамическом смысле процессами.

В рамках настоящей работы применительно к условиям распределения радиоволн рассмотрены лишь два слоя атмосферы – тропосфера и ионосфера. В связи с этим целью работы является обоснование основных путей антропогенного изменения преднамеренного характера условий распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере. Результаты выполненного в этом направлении исследования представлены ниже.

Основные пути изменения условий распространения радиоволн в тропосфере

Согласно [4], тропосфера – нижняя, основная часть атмосферы, особенно подверженная воздействиям со стороны земной поверхности, характеризующаяся убыванием температуры с высотой со средним вертикальным градиентом около $\gamma=0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Она простирается от поверхности земли до высоты 10 – 12 км в умеренных широтах, до 8 – 10 км в полярных и до 16 – 18 км в тропиках.

Несмотря на сравнительно небольшой слой (по сравнению со всей атмосферой), тропосфера имеет большое значение для распространения радиоволн (и, в частности, микроволн). Это объясняется следующими факторами [4-6]:

во-первых, в тропосфере сосредоточена основная масса всей атмосферы (около 80%) и почти вся масса водяного пара;

во-вторых, в тропосфере могут наблюдаться различного рода гидрометеоры (туман, дождь, снег, град) и облака всех основных форм, а также частицы различного происхождения (частицы пыли, продуктов извержения вулканов, горения растительного покрова и др.);

в-третьих, в тропосфере могут образовываться конвективные облака, которые среди облаков других форм, оказывают наиболее значительное влияние на распространение радиоволн. Это объясняется следующими обстоятельствами:

а) конвективные облака могут иметь значительную вертикальную протяженность (от 200 – 400 м до тропопаузы), что обуславливает их сложную фазовую структуру (в частности, в случае наличия кучево-дождевых облаков Сb));

б) из кучево-дождевых облаков могут выпадать осадки различного агрегатного состояния: дождь (включая ливневой), град, крупа, мокрый снег;

в) из кучево-дождевых облаков выпадают осадки, имеющие значительный размер (от нескольких мм (капли дождя, ливня) до нескольких см (град));

в-четвертых, на современном этапе представляется возможным с помощью определенных методов и средств модифицировать (видоизменять) как микрофизику облаков различных форм (волнистообразных, слоистообразных, облаков вертикального развития) (фазовое состояние, размеры и концентрацию капель и частиц льда), так и их геометрические характеристики (вертикальная протяженность, высоты нижней и верхней границ), так и количество облаков за счет рассеяния облачных слоев и разрушения конвективных облаков.

С учетом вышеизложенного, возникает необходимость детального исследования облаков различных форм в конкретных физико-географических районах (ФГР) России. В данной работе в качестве примера рассмотрен северный район Европейской территории России (ЕТР). Выбор этого района обусловлен возрастающим интересом к арктическому бассейну, прежде всего, в связи с его интенсивным освоением.

Одной из целей настоящей работы является определение основных путей модифицирования облаков различных форм в интересах изменения условий распространения радиоволн в тропосфере для решения прикладных задач.

Установленный к настоящему времени факт поглощения радиоволн (в частности, сантиметрового и миллиметрового диапазона – микроволн) осадками, облаками, туманами [1, 5, 7], а также факт модифицирования последних [6, 8] обуславливает необходимость по-новому подойти к классификации атмосферных облачных образований с учетом их применимости к проблеме распространения радиоволн в тропосфере. С учетом данного обстоятельства в таблице 1 представлены результаты выполненного в этом направлении исследования.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно сделать вывод о том, что они позволяют сделать следующие выводы:

во-первых, поскольку, согласно [1, 5, 7], наиболее сильное поглощение 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 (Сi), перисто-кучевые (Сс), перисто-слоистые (Сs)) в силу того, что они являются кристаллическими, не будут являться серьезным препятствием для прохождения микроволн [1, 5, 7];

в-третьих, интерес с точки зрения модифицирования облаков различных форм будут представлять только те из них, что отмечены в табл. 1, в последнем ее столбце.

Основным материалом для исследования характеристик облаков явились протоколы самолетного зондирования атмосферы (СЗА) ТАЭ-7,7 м (свыше трех тысяч подъемов самолетов-зондировщиков) над Архангельском за период 1953 – 1964 г.г.

Таблица 1. Характеристики облаков в соответствии с их международной классификацией применительно к проблеме распределения радиоволн в тропосфере

Форма облаков	Характеристики облаков									Перспективность для модифицирования облаков	
	Нижняя граница облаков, м	Вертикальная протяженность облаков	Фазовая структура	Размеры капель и частиц льда, мкм	Возможность выпадения осадков в естественных условиях	Возможность модифицирования с целью					Вид осадков
						вызывания осадков	Интенсифицирования осадков	рассеяния облаков	стабилизации облаков		
Перистые (Ci)	свыше 6000	от сотен м до 1 – 2 км	кристаллическая	частицы льда до 50 – 80 мкм (иногда до 100 мкм)	+	–	–	–	+	частицы льда	–
Перисто-кучевые (Cc)	свыше 6000	от сотен м	кристаллическая	частицы льда до 50 мкм (иногда до 100 мкм)	+	–	–	–	+	частицы льда	–
Перисто-слоистые (Cs)	свыше 6000	от сотен м	кристаллическая	частицы льда до 50 мкм (иногда до 100 мкм)	+	–	–	–	+	частицы льда	–
Высоко-кучевые (Ac)	2000 – 6000	до сотен м	капельная, смешанная, кристаллическая	облачные капли (50 – 60 мкм), частицы льда (десятки мкм)	+	+	+	+	+	капли, снег	+
Высоко-слоистые (As)	2000 – 6000	1 – 3 км	капельная, смешанная, кристаллическая (в зависимости от сезона и ФГР)	облачные капли (50 – 60 мкм), частицы льда (десятки мкм)	+	+	+	+	+	капли, снег	+
Слоисто-дождевые (Ns)	100 – 500	от сотен м до 3 – 5 км	капельная, смешанная, кристаллическая	облачные капли (50 – 60 мкм), частицы льда (десятки мкм)	+	–	+	–	–	капли, снег	+
Слоистые (St)	100 – 800	от сотен м до 1 км	капельная, смешанная, кристаллическая	облачные капли (50 – 60 мкм), частицы льда (50 – 60 мкм)	+	+	+	+	+	капли мороси, дождя, частицы снега	+
Слоисто-кучевые (Sc)	300 – 800	от сотен м до 1 км	капельная (в случае Cu cong м.б. и смешанная)	облачные капли (50 – 60 мкм), частицы льда (50 – 60 мкм)	+	+	+	+	+	капли мороси, дождя, частицы снега	+
Кучевые (Cu)	500 – 1000 (в зависи мости от формы)	от десятков до сотен м (Cu cong 1 – 5 км)	капельная, смешанная, кристаллическая	облачные капли (50 – 80 мкм), в Cu cong – капельные и смешанные (частицы льда 50 – 60 мкм)	–	+	+	+	+	капли дождя	+
Кучево-дождевые (Cb)	400 – 600	от нескольких км до 6 – 8 км	капельная, смешанная, кристаллическая	облачные капли (100 – 200 мкм), кристаллы льда (100 – 200 мкм)	+	–	+	–	–	капли ливня, град	+

Исследование характеристик облаков различных форм в конкретном ФГР обычно начинается с получения данных об их повторяемости. Так, например, такие данные применительно к северному району ЕТР приведены в таблице 2.

Из представленных в таблице 2 данных видно, 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 облаками, могут быть одним из объектов исследования.

Таблица 2. Относительная повторяемость (%) сплошной облачности различных форм над северным районом ЕТР (г. Архангельск)

Пункт	Наблюдаются							Число подъемов самолетов-зондировщиков
	Только St-Sc, одно- и многослойные	St-Sc в сочетании с Ac	Ns	As	Только Ac	Только Cu	Cu, Cb в сочетании со St-Sc, Ac	
Архангельск	36,1	4,2	37,0	13,5	4,0	4,2	1,0	1637
	23,2	7,4	19,6	12,9	14,9	16,0	6,0	1366

Примечание: числитель – холодное полугодие, знаменатель – теплое полугодие.

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

Для распространения радиоволн в тропосфере необходимы также сведения не только о повторяемости облаков различных форм в конкретном ФГР, но и об их расслоенности и фазовой структуре. С учетом этого в таблице 3 представлены результаты исследования расслоенности волнистообразных (St и Sc) облаков по сезонам.

Таблица 3. Повторяемость (%) одно- многослойных волнистообразных облаков над северным районом ЕТР (г. Архангельск)

Сезоны	Число облачных слоев				Число подъемов самолетов-зондировщиков
	один	два	три	четыре	
Зима	85,7	13,5	0,4	0,4	381
Весна	88,5	10,3	1,2	–	165
Лето	86,7	12,0	1,3	–	158
Осень	88,0	11,3	0,7	–	300

Можно видеть, что однослойные 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 приведены в таблице 4.

Из анализа данных таблицы 4 можно сделать вывод о том, что для фронтальных слоистообразных облаков 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).

Таблица 4. Повторяемость (%) одно- и многослойных фронтальных слоистообразных облаков над северным районом ЕТР (г.Архангельск)

Полугодия	Число облачных слоев					Число подъемов самолетов-зондировщиков
	один	два	три	четыре	пять	
Холодное	56,3	35,0	7,7	0,8	0,2	517
	41,1	40,1	15,0	3,5	0,3	314
Теплое	45,1	33,5	19,1	2,3	–	173
	41,9	38,5	17,0	2,6	–	270
Год	53,5	34,6	10,6	1,0	0,3	690
	41,4	39,4	15,9	3,1	0,2	584

Примечание: в числителе приведены данные, относящиеся к фронтальным слоистообразным облакам с осадками, в знаменателе – без осадков.

В силу этого в таблице 5 представлены результаты исследования фазовой структуры волнистообразных облаков над северным районом ЕТР по сезонам и полугодиям.

Таблица 5. Повторяемость (%) фазового состояния волнистообразных облаков над Архангельском

Фазовое состояние	Сезон				Полугодие	
	зима	весна	лето	осень	холодное	теплое
Капельное	60,3	68,30	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

Как следует из данных в таблице 5, 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 St-Sc облаков со смешанной фазой приходится не более 10-20%.

Полностью кристаллические St-Sc облака для данного района встречаются крайне редко (не более 2%).

Полученные и приведенные в таблице 6 результаты исследования фазового состояния фронтальных слоистообразных облаков 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.

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 водности и водозапасах облаков различных форм. Исходя из этого, в таблицах 7-9 представлены данные о средних значениях водности и водозапасов волнистообразных и слоистообразных облаков.

Таблица 6. Повторяемость (%) фазового состояния фронтальных слоистообразных облаков (ФСОБЛ) над Архангельском

Тип ФСОБЛ	Фазовое состояние облаков	Холодное полугодие		Теплое полугодие	
		Ns, Ns-As	As	Ns, Ns-As	As
I	Капельное	$\frac{18,5}{43,8}$	$\frac{3,1}{4,8}$	$\frac{40,0}{68,7}$	$\frac{27,0}{15,1}$
II	Капельное до H , выше – смешанное	$\frac{67}{5,0}$	$\frac{0,9}{1,1}$	$\frac{27,0}{9,8}$	$\frac{8,1}{4,0}$
III	Капельное до H , выше – кристаллическое	–	–	$\frac{0,7}{-}$	$\frac{2,7}{-}$
IV	Смешанное	$\frac{61,0}{44,0}$	$\frac{63,9}{62,4}$	$\frac{21,7}{16,1}$	$\frac{48,7}{56,6}$
V	Смешанное до H , выше – капельное	–	–	–	–
VI	Смешанное до H , выше – кристаллическое	$\frac{8,0}{2,2}$	$\frac{4,8}{4,2}$	$\frac{2,0}{2,7}$	$\frac{2,7}{5,6}$
VII	Кристаллическое	$\frac{4,7}{5,9}$	$\frac{26,9}{27,5}$	$\frac{2,0}{2,7}$	$\frac{5,4}{17,7}$
VIII	Кристаллическое до H , выше – смешанное	$\frac{1,1}{-}$	$\frac{0,4}{-}$	$\frac{6,6}{-}$	$\frac{5,4}{1,0}$
IX	Капельное до H , выше до H_I – смешанное, выше – кристаллическое	$\frac{1,1}{-}$	$\frac{0,4}{-}$	$\frac{6,6}{-}$	$\frac{5,4}{1,0}$
Число случаев		$\frac{464}{179}$	$\frac{227}{189}$	$\frac{152}{112}$	$\frac{37}{198}$

Примечание: числитель – данные по ФСОБЛ с осадками, знаменатель – без осадков.

Таблица 7. Средние значения водности (г/м^3) (числитель) и водозапасов (г/м^2) волнистообразных (знаменатель) облаков (г.Архангельск)

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

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

во-первых, средние значения водности как волнистообразных (St, Sc), так и слоистообразных (Ns, Ns-As) облаков отличаются по сезонам незначительно и находятся в пределах $0,19-0,32 \text{ г/м}^3$;

во-вторых, значения водности как в волнистообразных (St, Sc), так и в слоистообразных (Ns, NS-As) облаках 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 г/м^2 ($68\text{-}92 \text{ г/м}^2$ в зависимости от сезона). Значения водозапасов этих облаков (также, как и значения влажности в них) имеют тенденцию к их возрастанию в основном от холодного полугодия к теплому;

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

Таблица 8. Средние значения влажности (г/м^3) Ns (числитель) и Ns-As (знаменатель) облаков (г.Архангельск)

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

Таблица 9. Средние значения водозапасов (г/м^2) Ns и Ns-As облаков (г.Архангельск)

Форма облаков	Зима	Число случаев	Весна	Число случаев	Лето	Число случаев	Осень	Число случаев
Ns	142,0	112	181,0	67	279,0	32	196,0	109
Ns-As	544,0	20	117,0	22	869,0	23	774,0	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 их модифицирования с определенной целью (например, рассеяние облаков или изменение их фазового состояния, т.е. перевода их из капельного состояния в кристаллическое) в таблице 10 приведены данные о вертикальной протяженности волнистообразных и слоистообразных облаков.

Таблица 10. Средние значения вертикальной протяженности (км) волнистообразных и слоистообразных облаков (без осадков)

Форма 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

Заметим, что пригодными к рассеянию считались переохлажденные слоистообразные и волнистообразные облака капельного и смешанного строения с вертикальной протяженностью не более 1000 м. При этом средняя температура облачного слоя должна быть не выше минус 3°C [9].

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

Наряду с приведенными в настоящей работе характеристиками волнистообразных и слоистообразных облаков, в таблице 11 приведены количественные оценки пригодных к рассеянию облаков указанных выше форм над северным районом ЕТР.

Таблица 11. Оценки пригодности (%) к рассеянию переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков (г.Архангельск)

Формы 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 таблице 11 данных можно сделать вывод о том, что наиболее благоприятные условия для рассеяния переохлажденных волнистообразных 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 повторяемость пригодных к рассеянию облаков резко снижается (не более 12%). Вместе с тем, в переходные сезоны оценки пригодных к рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков достаточно высоки (75,5% весной и 57,6% осенью). Такие оценки пригодных к рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков можно объяснить сезонным ходом распределения температуры воздуха.

Полученные в настоящей работе оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию могут быть использованы при проведении работ с целью перевода их из капельного состояния в кристаллическое для улучшения условий распространения радиоволн. При этом расход реагента должен быть увеличен от 50 до 100%.

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

Полученные в таблице 11 оценки пригодности переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков вполне закономерно согласуются с выводом о том, что наиболее решенной в теоретическом плане и реализуемой на практике является проблема модифицирования именно переохлажденных атмосферных облачных образований [6, 8].

Для модифицирования переохлажденных облаков указанных форм в России к настоящему времени разработан ряд способов и методов, классификация которых приведена на рис.1.

Анализируя данные рис. 1, можно сделать вывод о том, что наибольшее применение на сегодняшний день нашел химический способ, включающий в себя методы с применением различных химических реагентов. В России в практике работ по модифицированию переохлажденных облаков и туманов нашли применение такие химические реагенты, как: хладореагенты (твердая углекислота и жидкий азот) и кристаллизующие вещества (йодистое серебро).



Рис. 1. Способы и методы воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака и туманы (ПВСОТ)

Для реализации указанных методов в России имеются соответствующие технические средства доставки и диспергирования указанных выше химических реагентов. Так, на рис. 2 (в качестве примера) представлены авиационные средства доставки последних [6].



Рис. 2. Авиационные технические средства воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака

Эти самолеты оборудованы специальными установками и генераторами для диспергирования соответствующих химических реагентов (см. рис. 3, 4, 5).



Рис. 3. Самолетный азотный генератор ГМЧЛ-А слева – общий вид; справа – распылитель



Рис. 4 Устройство для отстрела пиропатронов-генераторов

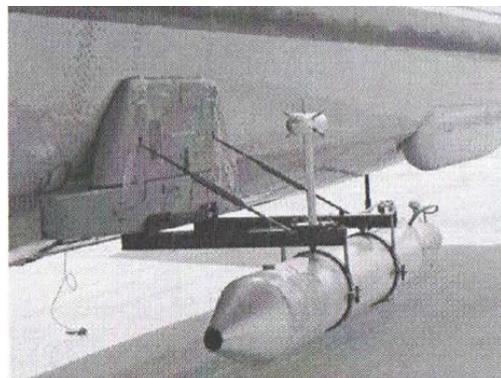


Рис. 5 Генератор для сжигания раствора йодистого серебра в ацетоне

Воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака с помощью указанных выше авиационных средств могут осуществляться на площадях в сотни, тысячи и более км² в зависимости от решаемой задачи и числа привлекаемых самолетов. Так, при ширине зоны кристаллизации от одной линии засева, равной 3 км, и скорости полета самолета 350 км/ч площадь засеянной облачности может составить более 1000 км² в течение 1 часа.

Использование авиационных средств засева переохлажденных облаков указанных форм с целью их рассеяния или перевода капельных облачных слоев в кристаллическое состояние открывает новые пути для изменения условий распространения радиоволн в тропосфере.

Таким образом, с учетом полученных выше результатов исследований применительно к переохлажденным волнистообразным и слоистообразным облакам над северным районом ЕТР можно сделать следующие 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 высокостроистых 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 сложной 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 при наличии в ней облаков различных форм. Кроме того, характеристики этих облаков могут явиться эталонными значениями для калибровки результатов исследования параметров облаков с помощью разрабатываемых радиолокационных методов и средств исследования природных объектов.

Кроме волнистообразных и слоистообразных облаков в атмосфере наблюдаются также и облака вертикального развития (конвективные облака), образующиеся, главным образом, в теплый период года. В связи с этим представляется важным проведение исследований по определению основных путей модифицирования конвективных облаков в интересах изменения условий распространения радиоволн в тропосфере для решения прикладных задач.

Конвективные облака – это облака вертикального развития, имеющие вид изолированных (иногда объединенных в гряды) облачных масс, вертикальные размеры которых одного порядка с горизонтальными. Эти облака заключаются в нижнем слое (в умеренных широтах – ниже 200 м), но нередко их верхние части находятся в среднем и верхнем ярусах. К ним относятся кучевые (Cu) и кучево-дождевые (Cb) облака.

В первой стадии развития конвекции кучевые облака могут быть кучевыми плоскими (Cu hum), а также разорванно-кучевыми (Cu fr). При возникновении хорошо оформленных восходящих токов значительной скорости возникают мощно-кучевые (Cu cong), иногда называемые грозowymi и градовыми [4].

С учетом вышеизложенного в таблице 12 приведены характеристики конвективных облаков различных форм применительно к проблеме распространения радиоволн в тропосфере. Анализ представленных в таблице 12 данных о характеристиках конвективных облаков позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективными формами облаков с точки зрения их модифицирования являются Cu cong и Cb облака.

В связи с этим представляют интерес сведения о существующих и перспективных методах модифицирования конвективных облаков. Результаты такого исследования обобщены на рис. 6. Видно, что количество методов модифицирования кучевых, градовых и грозowych облаков достаточно велико. Вместе с тем применительно к проблеме изменения условий распространения радиоволн в тропосфере наиболее

перспективными являются методы, позволяющие осуществить модифицирование облаков оперативно и на значительных площадях.

Таблица 12. Характеристики конвективных облаков различных форм применительно к проблеме изменения условий распространения радиоволн в тропосфере

Форма облаков	Характеристики облаков										Перспективность для модифицирования облаков
	Нижняя граница облаков, м	Вертикальная протяженность облаков	Фазовая структура	Размеры капель и частиц льда, мкм	Возможность выпадения осадков в естественных условиях	Возможность модифицирования с целью				Вид осадков	
						вызывания осадков	Интенсифицированы осадков	рассеяния облаков	стабилизации облаков		
Кучевые плоские (Cu hum)	ниже 1000 м	от десятка до сотен м	капельная	капли размером до 50 – 60 мкм	-	-	-	-	-	-	-
Кучевые средние (Cu med)	ниже 1000 м	от десятка до сотен м	капельная	капли размером до 50 – 60 мкм	-	-	-	-	+	-	-
Кучевые разорванные (Cu fr)	ниже 1000 м	от десятка до сотен м	капельная	капли размером до 50 – 60 мкм	-	-	-	-	-	-	-
Мощнокучевые (Cu cong)	от сотен м до 1000	до 5 км	капельная, смешанная	капли, частицы льда > 100 мкм	-	+	-	+	+	капли дождя (ливня)	+
Кучево-дождевые (Cb)	от сотен м до 1000	до 8 – 10 км (в умеренных широтах)	капельная – в нижней части смешанная – в средней части, кристаллическая – в верхней части облака	капли размером 100 – 200 мкм, град – несколько см	+	-	+	-	-	капли дождя (ливня), град, мокрый снег	+

Вполне очевидно, что на практике реализация таких методов должна быть осуществлена с использованием, прежде всего, авиационных средств, т.е. самолетов, оснащенных специальными установками и устройствами для ввода химических реагентов, в том числе и дистанционного запуска ракет класса «воздух-воздух».

Детальный анализ методов модифицирования конвективных облаков (см. рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективными из них будут методы, основанные:

во-первых, на создании нисходящих движений с целью разрушения конвективных облаков, в частности, Cu cong (методы 2.1–2.4);

во-вторых, на использовании химических реагентов для воздействия на конвективные облака, в частности, Cu cong, с целью вызывания искусственных осадков (методы 3.1–3.3).

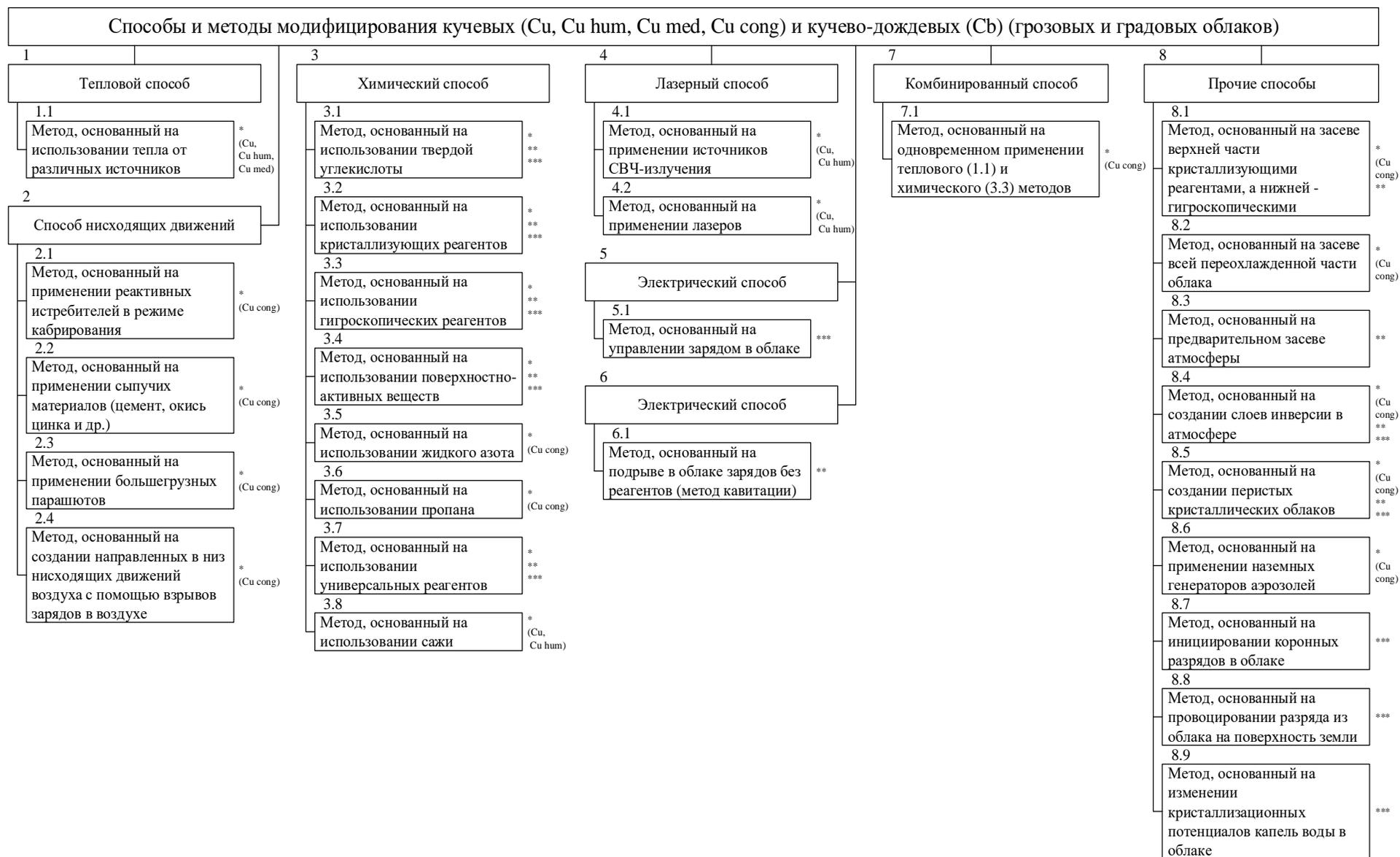


Рис. 6. Методы модифицирования кучевых (*), градовых (), и грозовых (***) облаков**

В результате проведения большого количества натуральных экспериментов по воздействию на конвективные облака обоснованы критерии пригодности ряда из них к модифицированию с целью вызывания искусственных осадков и разрушению облаков. Количественные значения характеристик конвективных облаков, определяющие возможность воздействия на конвективные облака с этими целями приведена на рис. 7 [10].

Наличие критериев пригодности конвективных облаков к модифицированию обусловило, в свою очередь, необходимость получения количественных оценок их пригодности к воздействию в конкретных физико-географических районах России.

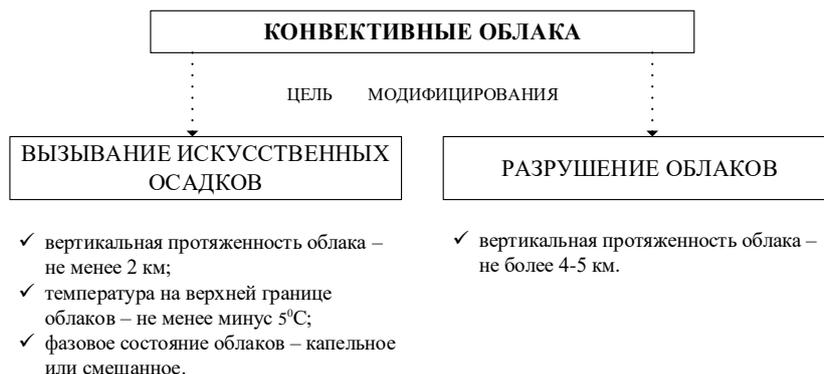


Рис. 7. Критерии пригодности конвективных облаков к модифицированию с целью вызывания искусственных осадков и разрушения облаков

Результаты исследований применительно к северному району ЕТР приведены на рис. 8-9.

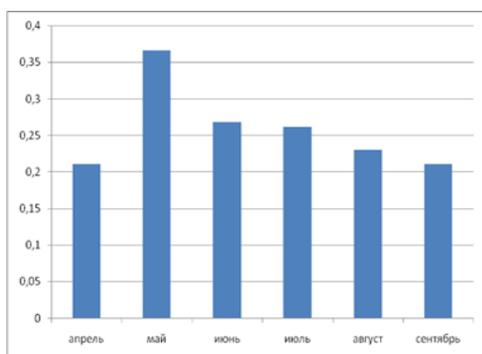


Рис. 8. Повторяемость пригодных для вызывания осадков конвективных облаков над северным районом ЕТР (г. Архангельск)

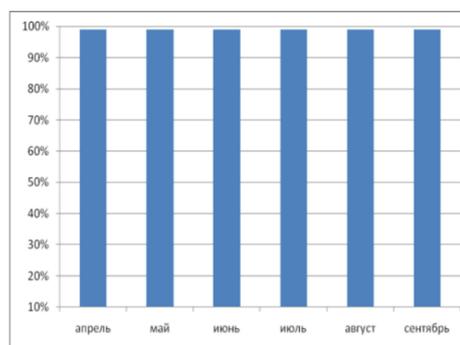


Рис. 9. Повторяемость (%) пригодных к разрушению конвективных облаков над северным районом ЕТР (г. Архангельск)

Анализ данных, приведенных на рис. 8-9, позволяет сделать следующие выводы:

- в среднем за теплое полугодие конвективные облака пригодны для воздействия с целью вызывания искусственных осадков в 25% случаев. При этом максимум значений повторяемости наблюдается в мае (36%), минимум (21%) – в апреле и сентябре;
- конвективные облака могут быть объектом воздействия с целью разрушения, если их вертикальная протяженность не превышает 4-5 км;
- воздействие на конвективные облака с целью их разрушения целесообразно проводить методом сброса сыпучих материалов с самолета (например, цемента марки 400). При таком методе воздействия на конвективные облака ни температура, ни фазовое строение облака во внимание не принимаются;

оценки повторяемости пригодных к разрушению конвективных облаков свидетельствуют о том, что в теплый период года для рассеяния пригодны 99% конвективных облаков. Столь высокие значения конвективных облаков, пригодных для разрушения, связаны с тем, что в северном районе ЕТР такие облака мощностью более 5 км достаточно редки ввиду северного расположения исследуемого района.

Кроме рассмотренных выше двух путей изменения условий распространения радиоволн в тропосфере (вызывание искусственных осадков и разрушение облаков) другие пути предусматривают воздействие непосредственно на грозовые и градовые облака с целью изменения размера частиц осадков (например, града). В этом случае такие пути будут предусматривать использование методов 3.1–3.4, 8.1 и 8.7. Заслуживают внимание также и методы 8.4–8.5, основанные на создании слоев инверсии и перистых кристаллических облаков в атмосфере. В этом случае исключается возможность образования конвективных облаков и роста их до формы кучево-дождевых облаков.

Еще один путь изменения условий прохождения радиоволн в тропосфере заключается в росте мощно-кучевых облаков до достижения ими стадии кучево-дождевых (градовых или ливневых). Достижение этого эффекта становится возможным при использовании метода засева облаков, в результате которого происходит изменение его динамики развития (эволюции). При использовании данного метода (на рис.1 метод 8.2) осуществляется засев всей части переохлажденного облака. Вследствие быстрой кристаллизации верхней части мощно-кучевого облака высвобождается большое количество тепла кристаллизации, что усиливает плавучесть облака и приводит к увеличению его вертикальной протяженности. В итоге мощно-кучевое облако превращается в кучево-дождевое, из которого впоследствии выпадают ливневые осадки или град.

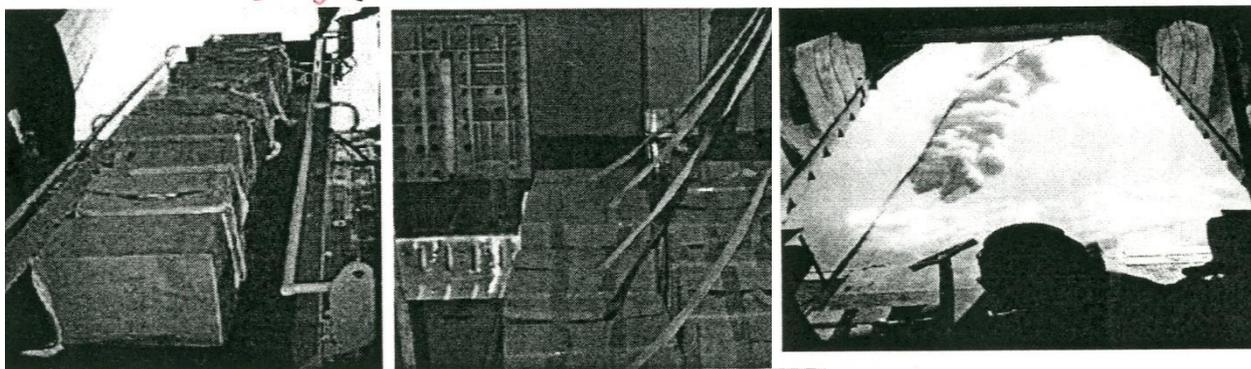
Применение этого метода модифицирования конвективных облаков (в частности, мощно-кучевых) будет определяться поставленной задачей. Техническая реализуемость данного метода, неоднократно проведенная в натуральных условиях (в частности, в США), не вызывает сомнений.

В России для воздействия на мощно-кучевые облака с целью их разрушения наибольшее применение нашел способ создания нисходящих потоков воздуха путем сброса с самолета в вершину облака крупнодисперсных сыпучих материалов (в частности, строительного цемента марки 400), помещенных в картонную упаковку емкостью 25 – 30 кг.

Для порционного введения порошкообразного реагента в облака используются упаковки с принудительным вскрытием, которые сбрасываются с самолета с помощью рольганговых и ленточных транспортеров или специальных с помощью ручных приспособлений (рис.10) [6].

Масса сбрасываемых упаковок с грубодисперсным порошком составляет 25-30 кг. Конструкция упаковки предусматривает ее принудительное раскрытие после сброса с борта самолета. При раскрытии упаковки ее корпус разделяется на небольшие элементы, безопасные как для наземных объектов, так и для воздушных судов. Следует отметить, что в последнее время из-за большой инерционности имеющихся транспортеров сброс упаковок осуществляется в основном операторами вручную.

На многих самолетах воздействия (например, Ан-12, Ан-26) установлены системы видео регистрации сброса порошкообразных реагентов. Система видео регистрации позволяет вести видеозапись процесса сброса и раскрытия упаковок на протяжении всего полета.



a)

б)

в)

Рис. 10. Транспортёр с упаковками на самолете АН-12 (а), упаковки, подготовленные для ручного сброса с самолета Ил-18 (б), ручной сброс упаковок с самолета Ан-72 (в)

В 2006 г. Агентством АТТЕХ совместно с ЛИИ имени М.М. Громова были успешно проведены испытания сброса порошкообразных реагентов с самолета Су-30 с использованием штатных контейнеров КМГУ-2 (рис.11) [8].

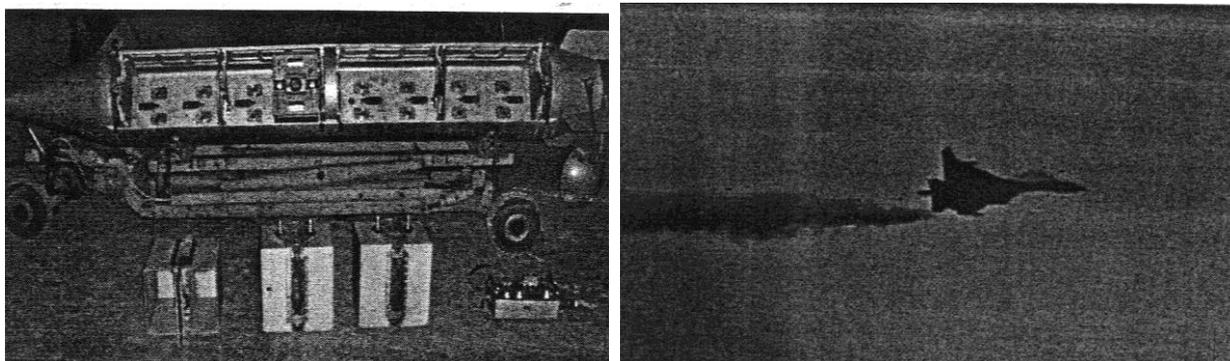


Рис. 11. Контейнеры КМГУ-2 для сброса с упаковкой с порошкообразным реагентов массой 14 кг и сброс упаковок с самолета СУ-30

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время имеются технические реализуемые пути изменения условий распространения радиоволн в тропосфере путем модифицирования также и конвективных облаков.

На основании приведенных выше исследований, касающихся конвективных облаков, можно сделать следующие выводы:

1. Выполнены оценки характеристик конвективных облаков различных форм (Cu hum, Cu cong, Cu med, Cu fr, Cb) применительно к проблеме изменения условий распространения радиоволн в тропосфере. Показано, что с учетом геометрических и микрофизических характеристик конвективных облаков наибольший интерес с точки зрения исследования возможностей распределения микроволн в тропосфере являются мощно-кучевые и кучево-дождевые облака.

2. Обоснованы основные пути модифицирования мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков с целью изменения условий распространения микроволн в тропосфере. Применительно к мощно-кучевым облакам они сводятся к методам, предусматривающим:

засев переохлажденной части облаков кристаллообразующими реагентами (в частности, йодистым серебром) или хладореагентами (твердая углекислота) с целью вызывания искусственных осадков;

сброс в верхнюю часть облака с самолета порошкообразных грубодисперсных реагентов (например, цемента марки 400) с целью создания нисходящих движений в нем, способных подавить восходящие потоки в облаке. В результате такого воздействия облака с вертикальной протяженностью не более 4-5 км через 15-20 минут разрушаются;

засев всей переохлажденной области облака кристаллизующими реагентами или хладореагентами для изменения его динамики, приводящей к росту мощности облака. Применительно к кучево-дождевым облакам методы модифицирования сводятся к доставке в них хладореагентов (твердой углекислоты) (метод 3.1), кристаллизующих реагентов (метод 3.2), гигроскопических реагентов (например, хлористый кальций – CaCl_2) (метод 3.3), поверхно-активных веществ (метод 3.4);

подрыву в облаке зарядов без реагентов (метод 8.1);

искусственному инициированию коронных разрядов в облаке путем доставки и диспергирования в нем большого количества металлических иголок размером 1-2 мм (метод 8.7).

3. Для доставки химических реагентов в конвективные облака целесообразно использовать авиационные средства (и, прежде всего, самолеты с потолком полета 8-12 км в умеренных широтах), оснащенных специальными контейнерами для отстрела пиропатронов-генераторов на дальность 1-2 км, а также устройствами для сброса сыпучих материалов (цемент) и твердой углекислоты. Применение самолетов позволяет оперативно и с высокой степенью точности осуществлять доставку реагентов в нужную область конвективных облаков, а также производить модифицирование на обширных площадях (тысячи км^2) и в течение длительного времени (несколько часов).

4. Предлагаемые в работе методы модифицирования конвективных облаков с целью изменения условий распределения радиоволн (и, прежде всего, микроволн) в тропосфере могут быть использованы при планировании, подготовке и проведении работ при решении различного рода задач в области радиолокации в интересах обеспечения хозяйственной и иной деятельности человека.

Рассмотрев возможные пути изменения условий прохождения радиоволн в тропосфере путем модифицирования волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков, перейдем к рассмотрению аналогичных путей в ионосфере.

Основные пути изменения условий распространения радиоволн в ионосфере

Согласно [4], ионосфера – атмосферные слои, простирающиеся от уровня 50-80 км до высоты около 400 км и характеризующиеся относительно высокой концентрацией положительных молекулярных и атомных ионов и свободных электронов. Положительные ионы и электроны вместе с нейтральными частицами образуют ионизированную плазму с большой электропроводностью, но квазинейтральную.

Ионосфера делится на области увеличенной ионной концентрации, называемыми D, E и F. Область D, от 60 до 110 км, где ночью ионизация почти исчезает, область E – от 110 до 140 км, область F подразделяется на два слоя: F_1 , от 140 до 220 км и F_2 – от 220 до 400 км. Некоторые авторы ограничивают ионосферу высотой порядка 400 – 500 км, близкой к верхней части слоя F; другие считают возможным распространять термин «ионосфера» на вышележащие слои атмосферы неограниченно, во всяком случае до очень больших высот.

В областях D и E преобладают молекулярные ионы кислорода и озота, в области F – атомные ионы гелия и водорода (протоны). Ионная концентрация в области D – от нескольких десятков до нескольких тысяч на 1 см^3 (в среднем ионизирована одна из 10^{11} молекул), в области E – до $2 \cdot 10^5$ и в областях F – до 10^6 на 1 см^3 (в среднем один ион на 10^3 молекул и атомов).

Верхние слои атмосферы (ВСА) (включая и ионосферу) находятся под непрерывным воздействием акустических и электромагнитных волн искусственного происхождения. Эти волны способны распространяться от земной поверхности до высот верхней атмосферы и воздействовать на ионосферу. Источниками таких волн могут быть различные виды антропогенных воздействий непреднамеренного характера, а именно: взрывы, полеты ракет и сверхзвуковых самолетов, шум городов, радиопередатчики, линии электросвязи и др. в настоящей работе рассматриваются антропогенные воздействия преднамеренного характера: ядерные взрывы, нагрев мощным электромагнитным излучением, выбросы химических соединений, полеты ракет и др.

Известные на сегодняшний день методы и средства воздействия на ионосферу представлены на рис. 12 [6, 11-18].

Не имея возможности охарактеризовать в полной мере все приведенные на рис. 12 методы и средства воздействия на ионосферу, остановимся лишь на рассмотрении тех из них, которые предусматривают применение взрывов химических ВВ, ядерных взрывов, использование плазмообразующих и плазмогасящих веществ, а также нагревных стенов как наиболее практически реализуемых на современном этапе.

Применение ядерных взрывов в космосе

Возникающие в атмосфере и ионосфере в результате проведения ядерных взрывов явления многообразны и многочисленны. Одним из них является дополнительная значительная ионизация ионосферы, во много раз превышающая ее естественный фон.

В общем случае ионизацию ионосферы при ядерном взрыве вызывают тепловые (жесткое и мягкое рентгеновское, жесткое ультрафиолетовое) и проникающие (γ -кванты, нейтроны, β -электроны) излучения, ударная и тепловая волны, плазменные и нейтральные продукты взрыва, разлетающиеся от точки взрыва с большой скоростью. Проявление того или иного процесса, приводящего к ионизации ионосферы, существенно зависит от мощности E_0 и, прежде всего, от высоты h_0 ядерного взрыва [11-16].

Испытание ядерного заряда мощностью 1,4 Мт на высоте 400 км (под названием Starfish prime «Морская звезда») было проведено США летом 1962 года. Следствиями этого взрыва явились [11]:

отключение возникшим электромагнитным импульсом электричества, выход из строя электроники и телефонной связи, ошибочное срабатывание сигнализации на Гавайях, расположенных на расстоянии 1500 км от эпицентра взрыва;

вывод из строя функционирующих в это время трех КА;

увеличение на 2 – 3 порядка концентрации заряженных частиц в радиационном поясе Земли;

возникновение в магнитосфере Земли обширного и мощного радиационного пояса, приведшего к очень быстрой деградации солнечных батарей и электроники у 7 спутников, в том числе, и у первого коммерческого телекоммуникационного «Телстар-1».

В общей сложности ядерный взрыв в космосе привел к выводу из строя трети спутников существовавшей тогда низкоорбитальной группировки, а образованный им радиационный пояс в дальнейшем пришлось учитывать при планировании полетов кораблей «Восток-3», «Восток-4» (в августе 1962 года), а также «Меркурий-8» (в октябре 1962 года). Кроме того, взрыв инициировал целую серию полярных сияний в последующие дни над территориями непривычно низких для такого рода явления широтах, что вызвало ложные помехи в системе радиосвязи. Последствия загрязнения магнитосферы были заметны еще в течение нескольких лет.

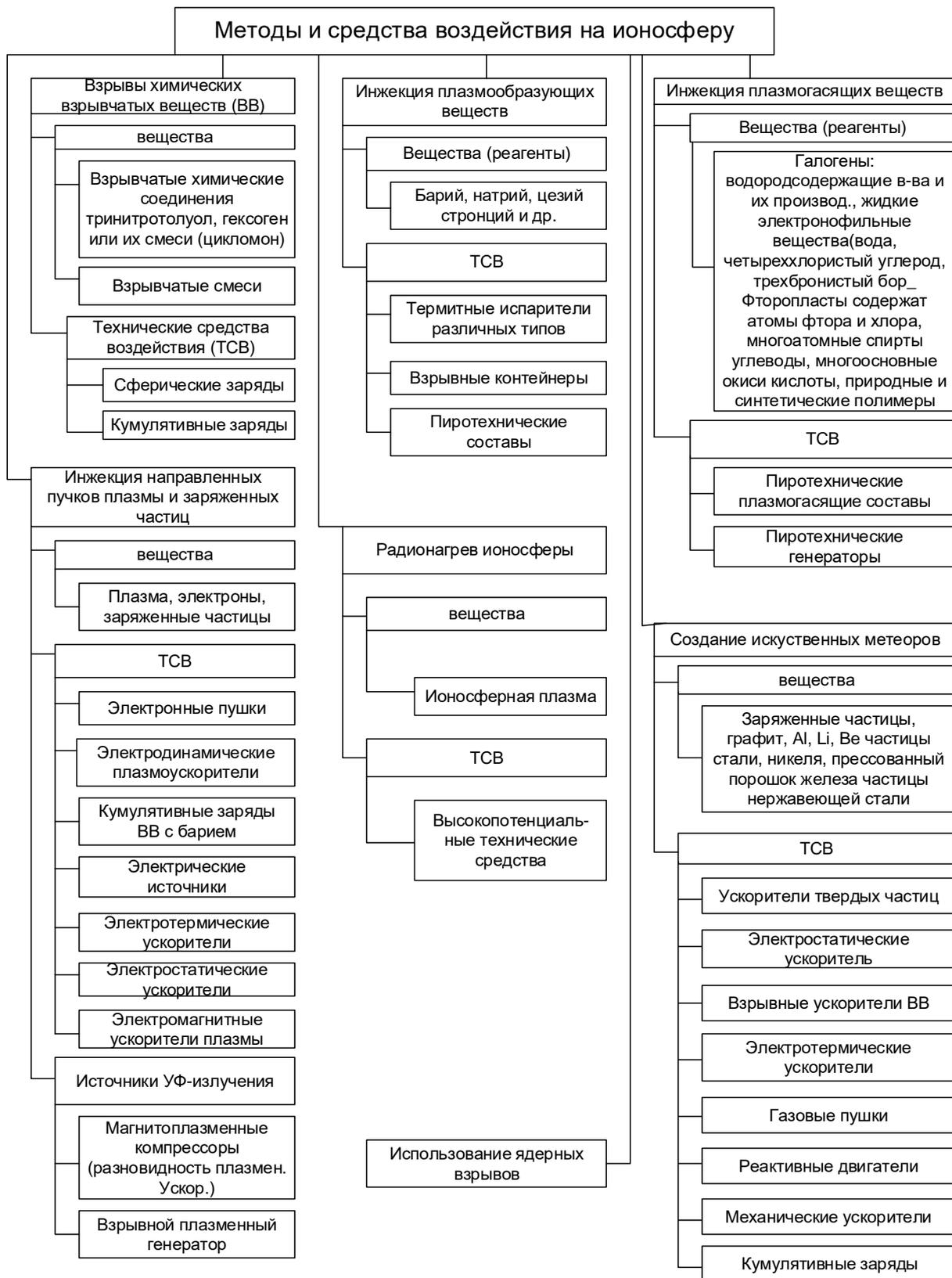


Рис. 12 Классификация методов и средств воздействия на ионосферу

Проведение подобных испытаний в наши дни привело бы к выходу из строя до 90% КА состава всей существующей низкоорбитальной группировки и невозможности на некоторое время осуществление пилотируемых полетов в космосе. Вместе с тем, испытание ядерного оружия показало, что оно является для космоса не только

эффективным, но и «обоюдно острым», так как его применение приведет к уничтожению не только космических средств противника, но и своих собственных КА.

Взрывы химических ВВ (взрывчатые вещества)

Взрыв представляет собой процесс быстрого (за 10^{-5} - 10^{-6} с) химического превращения системы, сопровождающейся переходом ее потенциальной энергии в кинетическую энергию образующихся газообразных продуктов взрыва. В настоящее время известно большое число ВВ, отличающиеся как по составу, так и по своим физико-химическим и взрывчатым свойствам. Все взрывчатые вещества могут быть разделены на две основные группы: взрывчатые химические соединения и взрывчатые смеси [8].

Взрывчатые химические соединения – относительно неустойчивые химические соединения, способные под влиянием внешних воздействий к быстрым экзотермическим превращениям. Большинство ВВ этой группы представляют собой кислородосодержащие органические соединения, способные к частичному или полному внутримолекулярному горению. В экспериментах по искусственной модификации ионосферы широко использовались относящиеся к этой группе ВВ соединения *TNT* – экзогенный тротил (тринитротолуол – $C_6H_2(NO_2)_2CH_3$), *RDX* – циклотит (тексотен – $C_3H_6O_6N_6$). Иногда используется смеси этих соединений. Например, циклотол содержит 23% *TNT* и 77% *RDX*.

Взрывчатые смеси представляют собой системы, состоящие, по крайней мере, из двух химически не связанных между собой компонентов. Обычно один из компонентов – окислитель – вещество, относительно богатое кислородом, второй компонент – горючее вещество, либо совсем не содержащее кислорода, либо содержащее его в количестве, недостаточном для полного внутримолекулярного окисления. В твердых взрывчатых смесях группы аммонитов окислителем является аммонийная селитра (нитрат аммония – NH_4NO_3), а горючими компонентами могут быть уголь, смола, либо нитроароматические взрывчатые соединения (тротил, динитробензол). Например, взрывчатая смесь амтол содержит 80% аммонийной селитры и 20% тротила. Использование химических ВВ для искусственного возмущения ионосферы началось с 60-х годов. В первых экспериментах, проведенных в рамках проекта «Firefly» к взрывчатой смеси весом 18-80 кг добавлялся цезий, который ионизировался под действием тепловой энергии взрыва и рассеивался в атмосфере с образованием электронного облака. Каждые 18 кг инжектируемой смеси давала 10 кг дисперсной окиси алюминия, 300 молей инертных газов (включая CO_2 , N_2 , H_2), 30 молей цезия, 1 моль натрия, наибольшее количество ионов цезия Cs^+ и свободных электронов. Детонация смеси проходила с большой скоростью, 6 км/с, с выделением энергии $6 \cdot 10^{14}$ эрг.

При взрывной инжекции в нижней ионосфере щелочных и щелочно-земельных элементов *Cs*, *Li*, *Ba*, имеющих более низкий потенциал ионизации, чем основные компоненты атмосферы N_2 , O_2 , образуются плазменные облака, которые могут быть зарегистрированы оптическими или радиолокационными методами. Благодаря этому появляется возможность фиксировать все фазы развития плазменных облаков, изучать их мелкомасштабную структуру и движение.

В первых экспериментах с использованием экзогенного тротила (проект «Firefly») и более поздних экспериментах (1968-1969 г.) осуществлялся подрыв сферического заряда (так называемый сферически симметрический взрыв). При сферическом заряде продукты взрыва и ударные волны распределяются преимущественно по сфере. При

этом быстро убывают давление, плотность и скорость газа, главным образом, вследствие уменьшения энергии взрыва по мере распространения продуктов детонации и ударных волн в непрерывно увеличивающемся объеме сферы [8].

В последующем начали применять заряды особой формы, имеющие на конце выемку для достижения кумулятивного эффекта. Взрывная инжекция бария чаще всего осуществляется посредством направленной осевой кумуляции. В этом методе используются заряды с выемкой в виде конуса, облицованного металлическим барием. При взрыве ВВ, окружающего облицовку, создается детонационная волна высокого давления, движущаяся с большой скоростью вдоль оси выемки и разрушающая стенки бариевой облицовки. В результате создается направленная высокоскоростная струя бария (рис. 13); скорость направленного потока бария увеличивается с уменьшением угла конической облицовки. Непосредственно детонацией заряда создается незначительное количество ионов Ba . Основная масса ионов Ba создается ионизацией УФ-излучения Солнца за время ~ 20 с.

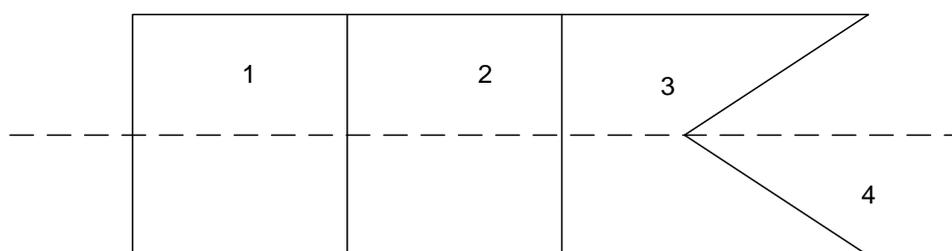


Рис. 13. Кумулятивный заряд: 1 – капсуль, детонатор; 2 – усилитель; 3 – заряд ВВ; 4 – коническая металлическая облицовка

Возникшие при направленной осевой кумуляции пары нейтральных атомов Ba могут достигать больших высот.

С использованием методов кумулятивной инжекции бариевых струй вдоль силовых линий магнитного поля проводились исследования топологии силовых линий, продольных электрических полей в магнитосфере, электрических полей в сопряженных областях. В нашей стране эксперименты с использованием кумулятивной инжекцией бария на высоте 170 км проводились в районе Волгограда в 1975 г. («Сполох») и в 1978 г. («Сполох-2») [8].

Кумулятивная инжекция бария перпендикулярно магнитному полю дает возможность изучать бесстолкновительные взаимодействия ионного пучка бария с окружающей плазмой и геомагнитным полем.

Следует отметить, что возмущение в ионосфере могут наблюдаться не только при взрывах на больших высотах, но и в условиях мощных наземных взрывов химических взрывчатых веществ. В качестве примера можно сослаться на проведенный в конце ноября 1981 года взрыв порядка 280 т химических ВВ в районе г. Алма-Аты (эксперимент «Масса») [12]. В ионосфере при этом наблюдались волновые возмущения, природа возникновения которых хорошо согласуется с представлениями о действии слабой ударной волны.

Инжекция плазмообразующих веществ

Наиболее технически простым способом создания искусственной плазмы в верхней атмосфере является использование в пространстве элементов с низким потенциалом ионизации. В табл. 13 приведены характеристики элементов, которые можно использовать для указанных целей [8].

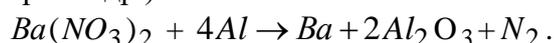
Первоначальный этап образования плазменного облака состоит в выпуске паров легкоионизируемого вещества, находящегося под высоким давлением, в окружающее, практически безвоздушное пространство.

Одним из первых веществ, которое было использовано для создания плазменного ионизированного облака была окись азота. В последних экспериментах с целью создания облаков с высокой концентрацией ионов использовались уже различные химические соединения щелочных металлов. Наиболее широкое применение в силу ряда своих преимуществ нашли барий и цезий.

Таблица 13. Характеристика легкоионизируемых элементов

Наименование вещества	Потенциал ионизации, эВ	Кэф-нт фотоион. на один атом, с ⁻¹	Атомный вес	Время фотоионизации	Степень взрывоопасности, токсичности
Цезий	3,89	$6,5 \cdot 10^{-4}$	132,91	1000	
Литий	5,36	$1,38 \cdot 10^{-4}$	6,94		
Рубидий	4,16	$1,06 \cdot 10^{-4}$	85,48		
Калий	4,32	$1,85 \cdot 10^{-5}$	39,1		Химически активен пожароопасен
Натрий	5,12	$1,01 \cdot 10^{-5}$	22,99		- / -
Барий	5,21	$2,07 \cdot 10^{-6}$	137,36	20-30	- / -
Кальций	6,09	$1,4 \cdot 10^{-6}$	40,08		
Магний	7,61	$3,6 \cdot 10^{-6}$	24,32		
Бериллий	9,28	$1,6 \cdot 10^{-7}$	9,01		Токсичен
Окись азота	9,25	$6 \cdot 10^{-7}$	30		

Для выпуска паров щелочных металлов в некоторых экспериментах использовались термохимические реакции. Например, реакции нитратов щелочных металлов (натрия, калия, бария и др.) с алюминием



Реакции этого типа сопровождаются выделением большого количества тепла, повышающего температуру внутри контейнера свыше 3000 К и давление до 100 ÷ 500 атмосфер. Выпуск паров легкоионизируемого металла из контейнера производится или в результате взрыва контейнера, или путем инъекции через специальное сопло, что приводило к образованию облака по следу движения ракеты, несущей контейнер. С целью повышения выхода щелочного металла в некоторых экспериментах в качестве восстановителя использовался магний, позволяющий получать более высокие значения температуры. В нашей стране для создания в ионосфере ионизированных облаков разработан специальный состав «Барий-2», состоящий из пероксида бария (BaO_2) и восстановителя – циркония. Состав обеспечивает более высокий выход парообразного бария в термохимической реакции по сравнению с магниевым и алюминиевым термитом и удобен в эксплуатации, т.к. обладает сравнительно низкой чувствительностью к удару и трению. Во французских и немецких экспериментах для испарения использовались реакции с самыми щелочными металлами.

Например, для бария ($I + n$) $Ba + CuO \rightarrow Cu + BaO + nBa$ образование окиси бария сопровождается выделением тепла (94 ккал/моль), которое обеспечивает испарение

оставшегося бария. Однако наличие в исходной смеси металлического бария, активно реагирующего с воздухом и водой, требует специальных мер предосторожности при эксплуатации этого вещества [8].

Скорость протекания процессов парообразования и выделения ионизированных газов в термохимических реакциях приведенных выше типов можно регулировать при помощи специальных добавок. Например, кремневые добавки позволяют изменить время горения термитов в реакциях от нескольких секунд до десятков секунд. Нитроцеллюлозные добавки, наоборот, увеличивают скорость протекания реакции и обеспечивают «взрывное» выделение паров металлов. Если слой термита с легкоионизируемым металлом чередовать со слоями специальных замедляющих добавок, то можно обеспечить «пульсирующий» характер инжекции паров металлов из контейнера в окружающее пространство. В зарубежных экспериментах по созданию искусственных плазменных образований в ионосфере использовались термиты сложного химического состава. Например, при образовании цезиевых облаков в США (шт. Виргиния, остров Уоллопс) применялась смесь, состоящая из 34% $CsNO_3$, 21% Al , 19% циклонита и 26% тротила. В экспериментах над Сахарой во Франции использовался термит с добавлением нитроглицерина и нитроцеллюлозы, составляющей 70% веса всей смеси [8].

Образование ионов и электронов в облаке легкоионизированных веществ определяется процессами термо- и фотоионизации, ударной ионизации, фотоотлипания и ударного отлипания электронов.

Конкурирующими процессами, снижающими концентрацию заряженной компоненты в облаке, является рекомбинация электронов и положительных ионов, прилипание электронов к атомам атмосферных газов, нейтрализация положительных и отрицательных ионов, процессы окисления нейтральных атомов легкоионизируемого металла атмосферным кислородом.

Средства для инжекции плазмообразующих веществ

Инжекция плазмообразующих веществ осуществляется с помощью пиротехнических устройств.

Пиротехнические устройства подразделяются на две группы, в которых получение целевого компонента происходит в результате испарения металла теплотой химической реакции, а целевой компонент является одним из продуктов химической реакции между горючими и окислителем [8].

Первая группа устройств получила название термитных испарителей. Эти испарители представляют собой цилиндрический стальной корпус с соплом. В корпус запрессовывается смесь алюминиевого термита и таблеток металлического натрия; с учетом потерь тепла требуется содержание термита в смеси довести до 75%. Поэтому, даже при 100% испарении выход паров натрия составляет 25%. Практический выход паров не превышает 1-2%.

Широкое развитие получили устройства, в которых используются пиротехнические составы, обеспечивающие получение целевого компонента в продуктах сгорания. Анализ химических соединений как возможных компонентов плазмообразующих составов показал, что наиболее реальными для практического использования из окислителей являются такие, как: нитраты бария, цезия, стронция, натрия, перекись бария, а из металлических горючих – магний, алюминий, цирконий, титан. По технологическим характеристикам, химической стабильности, полноте сгорания значительные преимущества имеют составы, использующие магний. Термодинамический анализ показывает, что все указанные выше щелочные и щелочно-земельные металлы могут быть восстановлены магнием в температурном интервале

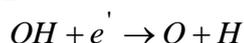
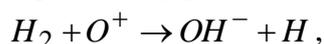
1000-2500°C. Причем, чем больше атомный вес металла, тем легче его восстановить до элементарного состояния.

Инжекция плазмогасящих веществ

Возможность активного воздействия на химические процессы в ионосфере привлекла внимание широких кругов ученых и печати в 1973 г. в связи с запуском космической станции «Скайлэб» ракетой «Сатурн-5», хотя для аналогичных задач в исследовательских целях химический метод использовался в США значительно ранее, еще в 1962 г. [8].

Во время запуска тяжелой РН этого типа, работающей на водороднокислородном топливе, по результатам ионосферного зондирования со спутника, который случайно находился над районом пуска, было обнаружено образование в ионосфере гигантской области с пониженной концентрацией электронов – «дыры». По сообщениям печати, диаметр этой области, созданной выхлопными парами отработанного топлива, составлял 1000-2000 км, а концентрация заряженных частиц в обедненной области упала до 0.05% от первоначальной. Эта область существовала 1-1,5 часа.

Исследование возможных процессов в ионосферном слое, инициированных выбросом водорода и воды, показало, что водород может изменить концентрацию электронов с помощью двухэтапной реакции [8]:



Скорость первой реакции равна $2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 / \text{с}$, скорость второй – $10^{-7} \text{ см}^3 / \text{с}$, т.е. скорость второй реакции была в 50 раз больше. Поэтому концентрация электронов в ионосфере определяется в основном первой реакцией. Промежуточный продукт процесса – ионы OH^+ могут присутствовать в ионосфере практически в малом количестве. Кроме этого, конкурирующие реакции, которые могут отнимать ионы OH^+ в реакциях с атмосферными молекулами водорода и кислорода на образование ионов воды и атомарного кислорода, имеют скорость реакции на два порядка меньшую по сравнению со второй реакцией рекомбинации. По этой причине, кроме указанных выше двух реакций, конкурирующими реакциями можно пренебречь. Это свойство обеспечивает водороду, как средству воздействия на ионосферу, явные преимущества по сравнению с бариевой плазмой, где конкурирующие реакции окисления приводят к большим потерям бария на высотах 80-150 км.

Выполненные расчеты по внесению 100 кг парообразного водорода на высоте 300 км в район 60° широты позволили сделать следующие выводы [8].

Примерно через 30 с после введения газа на высоте в 300 км в ионосфере создаются глубокие «дыры». Слой F_2 фактически распадается на 2 слоя, внутри которых в зоне воздействия кислородная концентрация падает практически до нуля. Резкое изменение концентрации электронов и кислорода вызывает интенсивный приток плазмы из верхней ионосферы в район воздействия, что должно привести к сравнительному сохранению верхних слоев ионосферы выше района воздействия, но и там их концентрация уменьшается. Нижний слой F_2 оказывается как бы отрезанным от притока плазмы и фактически исчезает полностью через 15 мин. Через 30 мин в ионосфере все еще существует область с пониженной концентрацией электронов, вплоть до высоты 600 км, где она составляет 40-60% от первоначальной. Через 1 час профиль ионосферы восстанавливается, но предельная концентрация на высотах 230-350 км остается ниже первичной на 45-50%. Это объясняется следующими причинами:

в ионосфере все еще присутствуют избыточные молекулы водорода, которые снижают скорость процессов рекомбинации.

Согласно выполненным расчетам, горизонтальный размер обедненной области в случае инъекции 100 кг водорода равняется 200-250 км.

Анализ показывает, что искусственно вызванный резкий приток плазмы из верхней ионосферы в район воздействия может привести к нарушениям в естественных протонных потоках в верхней ионосфере. Инъекция, например, 100 кг водорода вызывает появление в протоносфере добавочного потока величиной $3 \cdot 10^8$ протонов/см².

Средства для инъекции плазмोगасящих веществ

Одним из практических направлений для обеспечения эффективного снижения концентрации электронов в плазме является использование специальных пиротехнических составов, содержащих в продуктах сгорания плазмोगасящие (электрофильные) вещества.

Молекулы таких веществ легко соединяются со свободными электронами и образуют малоподвижные отрицательные ионы, что приводит к существенному снижению концентрации свободных электронов в плазме. Такими электрофильными свойствами обладают галогены, водородосодержащие вещества, их производные и некоторые другие соединения (*ОН, Н₂О, SF₆, CO₂, Cl₂, NO₂* и т.д.)

Использование плазмोगасящих составов, имеющих в продуктах сгорания высокое содержание элементов с энергией сродства к электрону более 1 эв, предпочтительнее.

Дисперсные частицы с большой работой выхода электронов также могут способствовать поглощению электронов в соответствии с процессом $P_z + e \rightarrow P_z^-$.

Используется также инъекция в плазму жидких электронофильных веществ путем распыления их через сопло (вода, четыреххлористый углерод, трехбромистый бор), однако организация распыления жидкости в заданном режиме и эффективного взаимодействия ее с плазмой является достаточно сложной задачей для практического использования. Кроме того, в реальных условиях картина испарения капелек жидкости и расположения химического вещества может резко измениться. В конечном итоге в среду могут поступить неразложившиеся химические вещества, многоатомные молекулы и радикалы, имеющие низкие значения энергии сродства к электрону, что приводит к резкому снижению эффективности электронофильных веществ [8].

Твердые пиротехнические плазмोगасящие составы, обеспечивающие получение электронофильных реагентов в процессе взрывчатого превращения, обладают рядом преимуществ:

1. Продукты сгорания плазмोगасящих составов поступают в плазму в активном состоянии (в виде потока газов электронофильных компонентов и соединений), для которых не требуется предварительной подготовки (испарения, разложения).
2. Они имеют большую плотность источника электронофильного газа.
3. Связываются компактными и автономны в работе.
4. Имеют высокую надежность действия.

Эффективными веществами для снижения электронной концентрации являются фторопласты, что можно объяснить высоким содержанием в них атомов фтора и хлора. Термическое разложение фторопластов в вакууме сопровождается в основном выходом мономера C_2F_4 и незначительным количеством фторметана CF_4 , C_3F_6 и других паров (HF , CO_2 , CF_2 , CF_3).

Получение плазмोगасящих реагентов в процессе взрывчатого превращения являются также эффективным в части создания искусственных облаков из полярных

молекул H_2O , CO_2 , CO , H_2 . Эти вещества в настоящее время используются в экспериментах на высотах F_2 – области.

В качестве водородогенерирующих композиций перспективны органические окислители в сочетании с магнием. К подобным водородосодержащим веществам относятся многоатомные спирты, углеводы, природные и синтетические полимеры. Для инъекции таких веществ разрабатываются соответствующие пиротехнические генераторы.

Радионагревные стенды

В середине 1950-х годов в ведущих странах появились планы облучать ионосферу мощными КВ-радиоволнами с целью исследования возможности [12, 13]:

- увеличения температуры заряженных частиц;
- изменения частоты соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами и атомами;
- изменение концентрации электронов;
- вызывание дополнительной ионизации ионосферы;
- возбуждение неустойчивости ионосферы и связанных с ней нелинейных процессов и явлений.

В прикладном плане предполагалось также использовать искусственные ионосферные возмущения для изменения траектории радиоволн на трассах, проходящих через них, а также использовать их в качестве эффективной антенны для излучения радиоволн КНЧ-ОНЧ диапазонах.

Воздействие на ионосферу осуществляется с помощью специальных радионагревных стендов, главными элементами которых являются мощные передатчики КВ-радиоволн и фазированные антенные решетки с большой эффективной мощностью излучения $P_{эфф}=P \cdot G$, где P – мощность, передаваемая к антенне; G – коэффициент усиления антенной системы. Очевидно, что радиоволны при своем распространении могут влиять только на движение заряженных частиц. Антенные системы стендов концентрируют энергию в луче, ширина которого порядка 12° . В результате область воздействия на ионосферу – горизонтальные размеры ионосферного возмущения на высоте 300 км составляют величину порядка 100 км.

Даже самый мощный из существующих стендов американский HAARP – создает на высоте 300 км поток энергии $\approx 0,003$ Вт/м², а на высоте 100 км - $\approx 0,03$ Вт/м². Для сравнения, поток электромагнитной энергии Солнца, доходящий до орбиты Земли составляет 1400 Вт/м² (солнечная постоянная). Видно, что «ионизационная способность» Солнца значительно выше, чем у радионагревного стенда. В большинстве экспериментов температура электронов T_e по сравнению с фоновой возрастает менее, чем на 50%, а концентрация электронов n_e – менее чем на 25%. В некоторых экспериментах наблюдалось увеличение T_e в несколько раз, а n_e – более чем в 1,5 раза [13].

Нейтральные частицы совсем, а ионы почти не испытывают влияния со стороны радиоволн. Столь малое увеличение концентрации электронов не может создать существенных помех для систем связи или современных радиолокационных станций. Однако, если на значительных участках пути радиоволны возникнут мелкомасштабные неоднородности, то это может вызвать ее существенное поглощение и изменение траектории, так как оба этих фактора в значительной мере зависят от градиентов диэлектрической проницаемости и проводимости. Изменение в ионосфере, вызванные излучением радионагревного стенда, после его выключения исчезают за время от секунд до десятка минут.

В настоящее время основными наиболее мощными радионагревными стендами являются: HAARP (Аляска, США), HIPAS (Аляска, США), Tromsø (Норвегия), SPEAR (остров Шпицберген) и Сура (Россия) [16-18].

В качестве примера ниже приведены основные параметры установки HAARP [16]: диапазон рабочих частот $f = 2,8 - 10$ МГц, эквивалентная излучаемая мощность в центре диаграммы направленности $PG = 250$ МВт на $f=2,8$ МГц и более 3000 МВт на $f=10$ МГц, облучаемая площадь на высоте порядка 350 км составляет ≈ 12250 и ≈ 875 км² соответственно для указанных выше конкретных частот. В принципе – этот коротковолновый нагревный стенд предназначен для исследования полярной ионосферы, который отличается от других более высокой величиной излучаемой мощности, в особенности для верхней части диапазона частот $f > 7 - 8$ МГц. Следует отметить что, на высоких широтах, помимо HAARP, уже функционируют еще три стенда. Последнее обстоятельство дает новые оттенки возможным последствиям от коллективного воздействия нагревных стендов на полярную ионосферу, что является предметом самостоятельного исследования.

С результатами исследований в области инжекции направленных пучков плазмы и заряженных частиц с помощью определенных технических средств и создания искусственных метеоров можно ознакомиться в таких работах, как например [12, 15].

Таким образом, можно констатировать, что наиболее вероятными путями изменения прохождения радиоволн в ионосфере могут быть:

взрывы химических взрывчатых веществ в верхней атмосфере и мощных наземных взрывов;

инжекция плазмообразующих и плазмोगасящих веществ в ионосфере;

разогрев ионосферы с помощью нагревных стендов;

ядерные взрывы на различных высотах в ионосфере.

Приведенные выше результаты исследований указывают на необходимость детального исследования характеристик облаков различных форм в тропосфере и характеристик заряженных частиц в ионосфере в интересах возможности изменения условий прохождения радиоволн в этих слоях путем применения специальных методов и средств модифицирования.

Литература

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
2. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации // Радиотехника и электроника, 2016, том 61, № 10, С. 927-939.
3. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. – Муром, 2009. – 166 с.
4. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
5. Кубанов В.П. Влияние окружающей среды на распространение радиоволн. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с.
6. Доронин А.П. Воздействия на атмосферные процессы и явления: учебное пособие.– СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 292 с.
7. Черный В.В. Влияние факторов природной среды на применение космических систем. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. – 222 с.
8. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012.-342 с.
9. Половина И.П. РЛ.: Гидрометеиздат, 1980. – 213 с.

10. Прихотько Г.Ф. Искусственные осадки из конвективных облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 176 с.
11. Ковалев А.П., Сотник С.А., Сотник Д.С. Космос как новая сфера вооруженной борьбы // Военная мысль.- 2023.- №3.- С.35-52.
12. Козлов С.И. Аэрономия искусственно возмущенных атмосферы и ионосферы Земли.- Москва: ТОРУС ПРЕСС, 2021.- 268 с.
13. Кулешов Ю.В., Краснов В.М., Готюр И.А. Основы физики космического пространства. Учебник / Под общ. ред. доктора техн. наук, проф. Ю.В. Кулешова.- СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022.-353 с.
14. Подгорный И.М. Активные эксперименты в космосе.- М.: Изд-во «Знание», 1974.- 64 с.
15. Козлов С.И., Сорокин В.М. Научные и прикладные проблемы исследований воздействий мощных радиоволн на ионосферу Земли // Электромагнитные волны и электронные системы.- 2011.- т.16.- №7.- С.4-9.
16. Адушкин В.В, Козлов С.И. К вопросу о геофизическом оружии // Геоэкология. Инженерная геоэкология. Гидрогеология. Геокриология.- 2011.- №2.-С.99-109.
17. Наумов Н., Никольский В., Перцев С., Руденко В. Военно-прикладные аспекты геофизических исследований за рубежом // Зарубежное военное обозрение.- 2014.- №1.- С.24-31.
18. Перцев С.Ф., Руденко В.В. Основные направления разработки геофизического оружия за рубежом и анализ перспектив его применения // Военная мысль.- 2013.- №4.- С.64-69.
19. Доронин А.П., Козлов С.И., Козлова Н.А., Тимощук А.С. К вопросу о классификации воздействий на различные слои атмосферы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, вып. 676.- 2021.- с. 138-144
20. Тимощук А.С., Доронин А.П., Петроченко В.М., Лебедева В.Ю. Классификация методов и средств модифицирования ионосферы и верхних слоев атмосферы применительно к проблеме оценивания возможных экологических последствий // Труды II Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева.- СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015.- С.262-265.