

Совершенствование международной стандартной атмосферы за счет введения зависимости высоты раздела тропосферы и стратосферы от приземной температуры.

Кочин А. В.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный
amarl@mail.ru

ГСА и МСА

Путаница (неверное толкование) терминов ГСА и МСА.

Глобальная справочная атмосфера (ГСА) представляет собой таблицу со значениями параметров атмосферы от 0 до 120 км для различных сезонов года и географических координат. Международная стандартная атмосфера (МСА) моделирует гипотетический вертикальный профиль температуры в некий условный день при фиксированной приземной температуре 288,2°К или 15°С. МСА используется для обработки результатов геофизических и метеорологических наблюдений с целью выявления аномалий и для приведения результатов испытаний летательных аппаратов к одинаковым условиям. Вертикальный градиент температуры в тропосфере задается величиной 0,65°С/100 метров, а в стратосфере предполагается наличие изотермии. МСА не является строгой метеорологической моделью фактических атмосферных условий и не учитывает наличие водяного пара и связанным с этим эффектов. Нестандартные (жаркие или холодные) дни моделируются путем добавления заданной разницы температур к стандартной температуре на высоте, но давление принимается за значение стандартного дня, поэтому профили температуры для жаркого дня, холодного дня, тропических и полярных регионов в зависимости от высоты могут быть определены для использования в качестве эталонных значений.

Глобальная справочная атмосфера (ГСА) представляет собой таблицу со значениями параметров атмосферы от 0 до 120 км для различных сезонов года и географических координат. Пример таблиц ниже.

ГОСТ Р 53460-2009 ГЛОБАЛЬНАЯ СПРАВОЧНАЯ АТМОСФЕРА ДЛЯ ВЫСОТ ОТ 0 ДО 120 КМ

Таблица 1 - Значение средней широтной температуры для декабря-января-февраля

В кельвинах

Геометрическая высота, м	Значение средней широтной температуры для широты																
	80° ЮШ	70° ЮШ	60° ЮШ	50° ЮШ	40° ЮШ	30° ЮШ	20° ЮШ	10° ЮШ	0°	10° СШ	20° СШ	30° СШ	40° СШ	50° СШ	60° СШ	70° СШ	80° СШ
0	267,8	271,0	273,3	283,5	290,4	295,2	299,8	300,2	299,0	298,8	294,8	286,4	277,6	269,5	260,4	251,7	243,2
500	265,3	268,2	271,2	280,6	287,8	293,0	296,9	297,0	296,3	296,1	292,4	284,3	275,7	268,6	260,7	253,4	246,1
1000	262,7	265,4	268,7	277,7	285,2	290,7	294,0	293,9	293,5	293,4	290,0	282,2	273,7	267,6	260,9	255,1	248,9
1500	259,9	262,5	266,3	274,7	282,4	288,5	291,4	290,8	291,0	290,6	287,5	279,8	271,7	266,2	260,3	255,5	250,0
2000	257,2	259,9	264,1	272,4	280,1	286,2	288,9	288,3	288,4	288,2	285,4	277,8	269,6	264,2	258,3	253,6	248,6
3000	250,0	254,5	259,2	267,6	275,4	281,3	283,5	283,3	283,2	283,3	281,0	273,3	265,1	259,7	253,8	249,4	245,0
4000	244,4	248,9	253,1	261,6	269,5	275,3	277,8	277,9	277,6	277,9	275,5	267,4	259,0	253,6	247,7	243,5	239,3
5000	239,7	243,3	247,1	255,7	263,4	269,2	272,0	272,3	272,1	272,3	269,7	261,4	252,9	247,5	241,6	237,6	233,6
6000	234,3	237,4	241,0	249,4	257,0	262,8	266,2	266,6	266,4	266,5	263,7	255,2	246,3	241,0	235,5	231,8	228,2
7000	229,1	231,4	234,7	242,6	249,9	255,7	259,5	259,9	259,7	259,7	256,8	248,4	239,3	234,3	229,4	226,0	222,9
8000	223,8	225,4	228,4	235,8	242,7	248,7	252,8	253,3	253,0	252,9	249,9	241,5	232,3	227,6	223,2	220,1	217,5
9000	222,3	222,6	224,2	229,2	235,5	241,6	246,1	246,6	246,3	246,1	242,9	234,7	225,5	221,6	218,8	216,6	214,8
10000	225,1	224,7	225,2	226,1	229,5	234,8	239,0	239,4	239,2	239,0	235,8	229,0	222,1	219,5	217,9	215,9	214,3
11000	227,8	226,8	226,2	223,4	224,0	228,1	231,3	231,3	231,2	231,0	228,6	223,7	219,0	217,5	217,0	215,1	213,8
12000	229,2	227,9	226,9	221,2	218,7	221,4	223,6	223,2	223,2	223,0	221,4	218,6	216,7	216,5	216,7	214,8	212,9
13000	230,2	228,8	227,5	221,3	216,7	215,9	216,1	215,3	215,3	215,4	214,8	215,3	216,7	217,2	217,2	214,8	212,4
14000	231,1	229,4	228,0	221,1	215,0	210,9	208,8	207,6	207,7	207,9	208,7	212,1	216,1	217,1	216,9	214,1	211,3
15000	231,9	229,9	228,3	220,8	213,7	207,5	203,5	201,8	201,8	202,2	204,0	209,4	215,0	216,6	216,4	213,4	210,6
16000	232,6	230,4	228,6	220,4	212,4	204,2	198,7	196,4	196,5	196,9	199,6	206,7	213,7	216,0	216,7	213,7	210,4
17000	233,1	230,8	228,3	220,8	212,3	203,5	197,2	194,5	194,4	194,9	198,6	206,1	213,6	215,5	216,1	213,0	209,5
18000	233,6	231,3	228,7	221,4	213,6	05,8*	200,5	198,2	197,8	198,5	201,3	207,4	213,6	215,1	215,6	212,3	208,6

Таблица 12 - Значение средней широтной плотности для сентября-октября-ноября

В килограммах на кубический метр

Геометрическая высота, м	Значение средней широтной плотности для широты																
	80° ЮШ	70° ЮШ	60° ЮШ	50° ЮШ	40° ЮШ	30° ЮШ	20° ЮШ	10° ЮШ	0°	10° СШ	20° СШ	30° СШ	40° СШ	50° СШ	60° СШ	70° СШ	80° СШ
0	1,34E+00	1,34E+00	1,27E+00	1,25E+00	1,23E+00	1,18E+00	1,14E+00	1,17E+00	1,21E+00	1,16E+00	1,17E+00	1,20E+00	1,20E+00	1,23E+00	1,27E+00	1,31E+00	1,37E+00
500	1,26E+00	1,26E+00	1,20E+00	1,19E+00	1,17E+00	1,14E+00	1,10E+00	1,12E+00	1,15E+00	1,11E+00	1,12E+00	1,14E+00	1,15E+00	1,18E+00	1,21E+00	1,24E+00	1,29E+00
1000	1,18E+00	1,18E+00	1,14E+00	1,13E+00	1,12E+00	1,09E+00	1,06E+00	1,07E+00	1,08E+00	1,06E+00	1,07E+00	1,09E+00	1,10E+00	1,12E+00	1,15E+00	1,17E+00	1,20E+00
1500	1,13E+00	1,11E+00	1,08E+00	1,07E+00	1,06E+00	1,04E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,03E+00	1,05E+00	1,07E+00	1,09E+00	1,10E+00	1,13E+00
2000	1,06E+00	1,04E+00	1,03E+00	1,02E+00	1,01E+00	9,93E-01	9,78E-01	9,74E-01	9,73E-01	9,70E-01	9,72E-01	9,84E-01	1,00E+00	1,02E+00	1,03E+00	1,05E+00	1,06E+00
3000	9,62E-01	9,28E-01	9,17E-01	9,14E-01	9,07E-01	8,93E-01	8,82E-01	8,78E-01	8,78E-01	8,79E-01	8,79E-01	8,88E-01	9,02E-01	9,10E-01	9,21E-01	9,31E-01	9,45E-01
4000	8,66E-01	8,32E-01	8,28E-01	8,29E-01	8,25E-01	8,13E-01	8,04E-01	7,99E-01	7,99E-01	8,02E-01	8,01E-01	8,09E-01	8,20E-01	8,27E-01	8,34E-01	8,40E-01	8,50E-01
5000	7,38E-01	7,33E-01	7,34E-01	7,40E-01	7,40E-01	7,33E-01	7,25E-01	7,21E-01	7,20E-01	7,25E-01	7,22E-01	7,29E-01	7,38E-01	7,40E-01	7,43E-01	7,45E-01	7,50E-01
6000	6,67E-01	6,63E-01	6,65E-01	6,66E-01	6,64E-01	6,56E-01	6,48E-01	6,43E-01	6,43E-01	6,44E-01	6,45E-01	6,51E-01	6,60E-01	6,63E-01	6,67E-01	6,70E-01	6,74E-01
7000	5,92E-01	5,90E-01	5,96E-01	6,01E-01	6,04E-01	6,00E-01	5,93E-01	5,90E-01	5,89E-01	5,90E-01	5,91E-01	5,96E-01	6,03E-01	6,03E-01	6,02E-01	6,02E-01	6,02E-01
8000	5,11E-01	5,11E-01	5,23E-01	5,32E-01	5,40E-01	5,40E-01	5,36E-01	5,33E-01	5,33E-01	5,33E-01	5,34E-01	5,38E-01	5,42E-01	5,39E-01	5,33E-01	5,30E-01	5,26E-01
9000	4,46E-01	4,45E-01	4,55E-01	4,61E-01	4,72E-01	4,77E-01	4,76E-01	4,74E-01	4,73E-01	4,73E-01	4,75E-01	4,77E-01	4,77E-01	4,72E-01	4,62E-01	4,57E-01	4,53E-01
10000	3,84E-01	3,84E-01	3,98E-01	4,05E-01	4,16E-01	4,21E-01	4,20E-01	4,19E-01	4,19E-01	4,19E-01	4,20E-01	4,22E-01	4,21E-01	4,17E-01	4,05E-01	3,97E-01	3,90E-01
11000	3,25E-01	3,24E-01	3,38E-01	3,48E-01	3,62E-01	3,74E-01	3,78E-01	3,78E-01	3,78E-01	3,78E-01	3,79E-01	3,77E-01	3,72E-01	3,64E-01	3,47E-01	3,36E-01	3,27E-01
12000	2,76E-01	2,76E-01	2,89E-01	2,96E-01	3,09E-01	3,23E-01	3,33E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,30E-01	3,20E-01	3,12E-01	2,96E-01	2,87E-01	2,81E-01
13000	2,34E-01	2,34E-01	2,44E-01	2,52E-01	2,67E-01	2,82E-01	2,93E-01	2,96E-01	2,96E-01	2,97E-01	2,96E-01	2,89E-01	2,78E-01	2,68E-01	2,53E-01	2,44E-01	2,38E-01
14000	1,98E-01	1,99E-01	2,10E-01	2,17E-01	2,28E-01	2,42E-01	2,55E-01	2,60E-01	2,61E-01	2,61E-01	2,59E-01	2,51E-01	2,38E-01	2,29E-01	2,18E-01	2,12E-01	2,08E-01
15000	1,64E-01	1,66E-01	1,76E-01	1,87E-01	1,98E-01	2,11E-01	2,23E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,29E-01	2,27E-01	2,19E-01	2,06E-01	1,98E-01	1,88E-01	1,82E-01	1,78E-01
16000	1,43E-01	1,44E-01	1,52E-01	1,57E-01	1,67E-01	1,80E-01	1,92E-01	1,96E-01	1,96E-01	1,96E-01	1,95E-01	1,87E-01	1,75E-01	1,67E-01	1,58E-01	1,54E-01	1,52E-01
17000	1,22E-01	1,24E-01	1,32E-01	1,39E-01	1,45E-01	1,55E-01	1,63E-01	1,66E-01	1,67E-01	1,67E-01	1,65E-01	1,59E-01	1,51E-01	1,46E-01	1,40E-01	1,37E-01	1,35E-01
18000	1,02E-01	1,04E-01	1,11E-01	1,21E-01	1,27E-01	1,34E-01	1,40E-01	1,42E-01	1,42E-01	1,43E-01	1,42E-01	1,37E-01	1,31E-01	1,27E-01	1,22E-01	1,19E-01	1,18E-01
19000	8,30E-02	8,40E-02	9,10E-02	1,03E-01	1,09E-01	1,14E-01	1,17E-01	1,19E-01	1,19E-01	1,19E-01	1,19E-01	1,16E-01	1,12E-01	1,08E-01	1,04E-01	1,02E-01	1,00E-01
20000	7,10E-02	7,20E-02	7,60E-02	8,60E-02	9,10E-02	9,40E-02	9,60E-02	9,70E-02	9,70E-02	9,70E-02	9,60E-02	9,50E-02	9,20E-02	9,00E-02	8,60E-02	8,40E-02	8,20E-02
21000	6,00E-02	6,20E-02	6,60E-02	7,20E-02	7,50E-02	7,70E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,80E-02	7,70E-02	7,60E-02	7,50E-02	7,30E-02	7,20E-02	7,10E-02
22000	5,00E-02	5,20E-02	5,60E-02	6,30E-02	6,50E-02	6,60E-02	6,70E-02	6,60E-02	6,70E-02	6,70E-02	6,70E-02	6,70E-02	6,60E-02	6,50E-02	6,30E-02	6,20E-02	6,10E-02
23000	4,50E-02	4,60E-02	4,70E-02	5,30E-02	5,50E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,60E-02	5,50E-02	5,40E-02	5,20E-02	5,10E-02
24000	4,00E-02	4,00E-02	3,80E-02	4,50E-02	4,60E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,60E-02	4,70E-02	4,60E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,70E-02
26000	1,95E-02	2,17E-02	2,49E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,74E-02	2,76E-02	2,75E-02	2,75E-02	2,75E-02	2,79E-02	2,82E-02	2,85E-02	2,71E-02	2,66E-02	2,57E-02	2,50E-02
28000	1,63E-02	1,81E-02	2,08E-02	2,27E-02	2,27E-02	2,29E-02	2,31E-02	2,30E-02	2,30E-02	2,30E-02	2,33E-02	2,36E-02	2,39E-02	2,26E-02	2,22E-02	2,15E-02	2,09E-02
30000	1,30E-02	1,46E-02	1,67E-02	1,82E-02	1,83E-02	1,85E-02	1,87E-02	1,86E-02	1,85E-02	1,85E-02	1,88E-02	1,90E-02	1,93E-02	1,82E-02	1,78E-02	1,73E-02	1,68E-02
32000	9,79E-03	1,10E-02	1,26E-02	1,37E-02	1,39E-02	1,41E-02	1,42E-02	1,41E-02	1,40E-02	1,41E-02	1,42E-02	1,45E-02	1,46E-02	1,37E-02	1,34E-02	1,31E-02	1,27E-02
34000	7,12E-03	7,98E-03	9,14E-03	9,86E-03	9,94E-03	1,02E-02	1,03E-02	1,02E-02	1,01E-02	1,02E-02	1,03E-02	1,05E-02	1,07E-02	9,83E-03	9,56E-03	9,32E-03	9,02E-03
36000	5,21E-03	5,80E-03	6,57E-03	7,03E-03	7,00E-03	7,26E-03	7,35E-03	7,31E-03	7,25E-03	7,31E-03	7,40E-03	7,55E-03	7,67E-03	6,95E-03	6,72E-03	6,50E-03	6,22E-03

Международная стандартная атмосфера

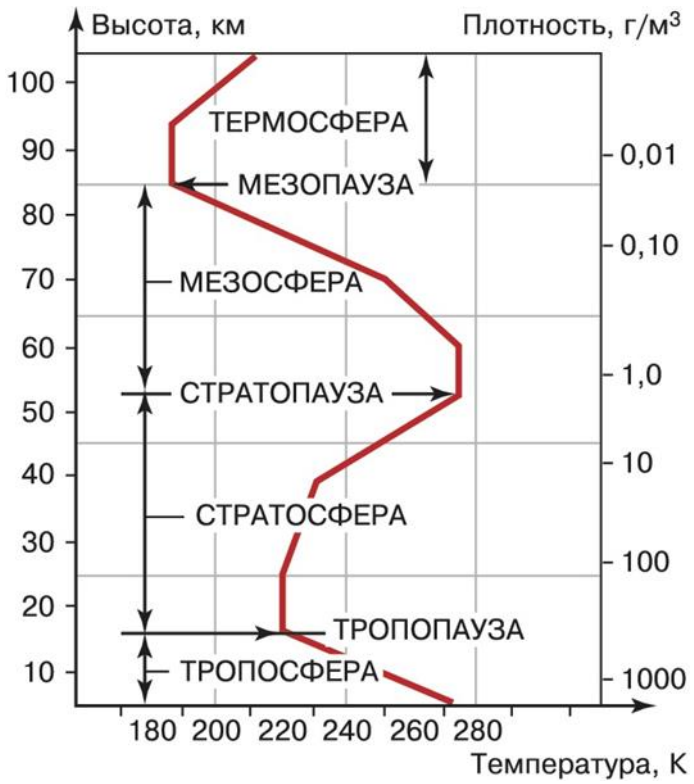


Рис. 1. График температуры в международной стандартной атмосфере (МСА).

Гипотетический вертикальный профиль температуры в МСА для некого условного дня при фиксированной приземной температуре 288,2°К или 15°С

При проектировании ЛА все расчеты проводятся для условий Международной стандартной атмосферы (МСА), что позволяет сравнить результаты расчетов и летных испытаний нескольких ЛА, проводимых в различных климатических поясах, путем пересчета результатов испытаний на параметры международной стандартной атмосферы, «поместив» все ЛА в одинаковые условия - условия МСА.

Регулирование деятельности по совершенствованию ГСА и МСА.

Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 апреля 2021 г. N 505 сформирован новый технический комитет по стандартизации - «Стандартная атмосфера» (ТК 484).

Понятие стандартной атмосферы было принято в конце 1970-х годов Международной организацией по стандартизации (ИСО) по инициативе Советского Союза и означает условное вертикальное распределение температуры, давления и плотности воздуха в атмосфере Земли. Также наша страна стала разработчиком базовых международных стандартов в этой сфере, которые активно используются до сих пор, в том числе в документах Международной организацией гражданской авиации (ИКАО).

Новый ТК создан в целях актуализации и совершенствования показателей стандартной атмосферы, которые будут использованы при расчётах и проектировании авиационной и космической техники, при обработке результатов геофизических и метеорологических наблюдений, а также для приведения результатов испытаний летательных аппаратов, в том числе, беспилотных, к одинаковым условиям. Еще одной важной задачей для нового технического комитета станет разработка инструментов применения новых информационных технологий и инновационных подходов для цифровой трансформации стандартов и сквозной цифровизации научных исследований и разработок в сфере стандартной атмосферы (в том числе, для показателей атмосферы для высот от 0 до 3000 м, от 1 до 25 км, от 30 до 120 км).

Функции по ведению секретариата ТК 484 возложены на ФГУП «Стандартинформ», на пост председателя ТК назначен доцент МАИ Никита Куприков.

В состав ТК 484 вошли организации высшего образования (ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации»), научные и исследовательские организации (ГНЦ РФ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», ГНЦ РФ ФГУП «ЦАГИ», ГНЦ РФ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»), Межгосударственный авиационный комитет, производственные предприятия и организации. Важной задачей для нового технического комитета также станет представление интересов Российской Федерации в Международной организации по стандартизации в рамках подкомитета 6 технического комитета по стандартизации ИСО ТК 20 «Стандартная атмосфера», председательство и секретариат которого традиционно закреплены за Российской Федерацией.

Недостатки МСА.

Вертикальный градиент температуры в тропосфере задается величиной 0,65°C/100 метров, а в стратосфере предполагается наличие изотермии. Нестандартные (жаркие или холодные) дни моделируются путем добавления заданной разницы температур к стандартной температуре на высоте. Давление принимается за значение стандартного дня, поэтому профили температуры для жаркого дня, холодного дня, тропических и полярных регионов в зависимости от высоты могут быть определены для использования в качестве эталонных значений.
Подобное построение МСА не позволяет учитывать региональные аномалии (тропические и полярные зоны) и временные изменения (годовые колебания температуры). Недостатки МСА можно преодолеть, если ввести переменную высоту изменения величины вертикального градиента температуры, которое происходит на границе между тропосферой и стратосферой и соответствует высоте тропопаузы. Подобный подход позволяет создать общую модель атмосферы, так как изменение средних величин вертикальных градиентов температуры в тропосфере и стратосфере относительно невелико.

Изменчивость профилей температуры.

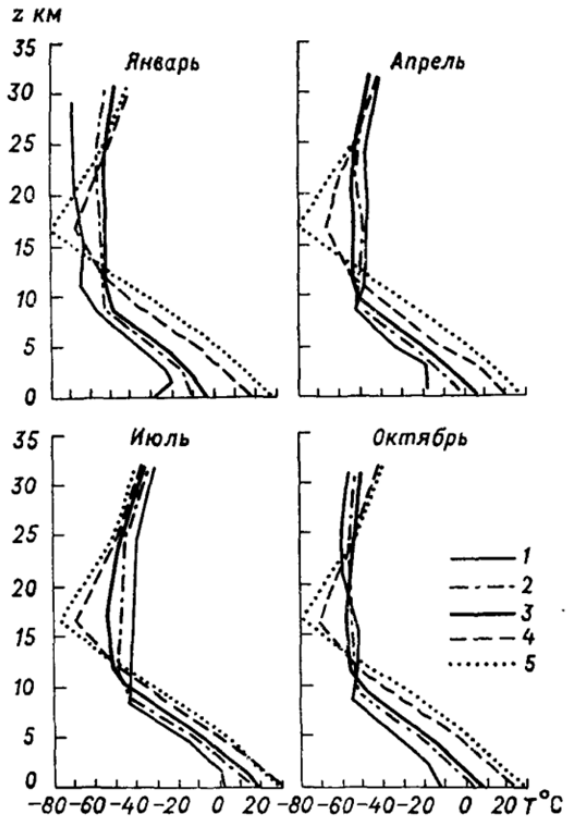
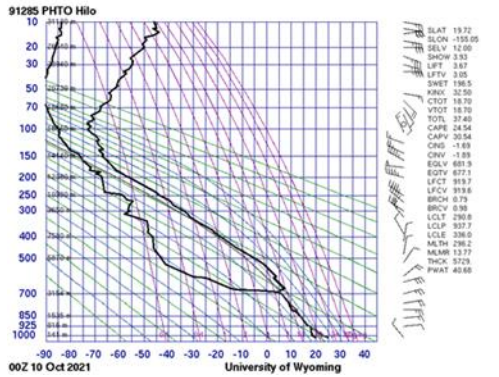


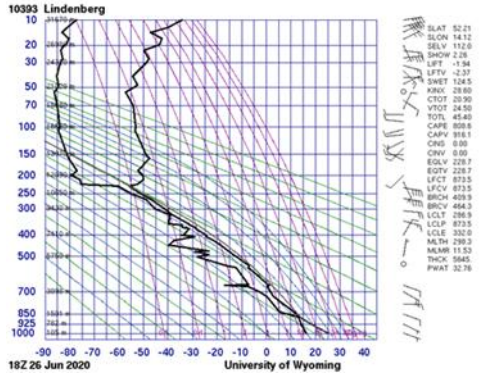
Рис. 12.3. Распределение средней (за месяц) зональной температуры с высотой.

1) 80° с. ш., *2*) 60° с. ш., *3*) 50° с. ш., *4*) 30° с. ш., *5*) 10° с. ш.

Рис.2. Осредненные вертикальные профили температуры.
Гаврилова Л. А. 1982. Аэроклиматология. ЛГМИ



а



б

Рис. 3. Реальные профили в Южном (а) и Северном (б) полушариях

Масштаб высоты

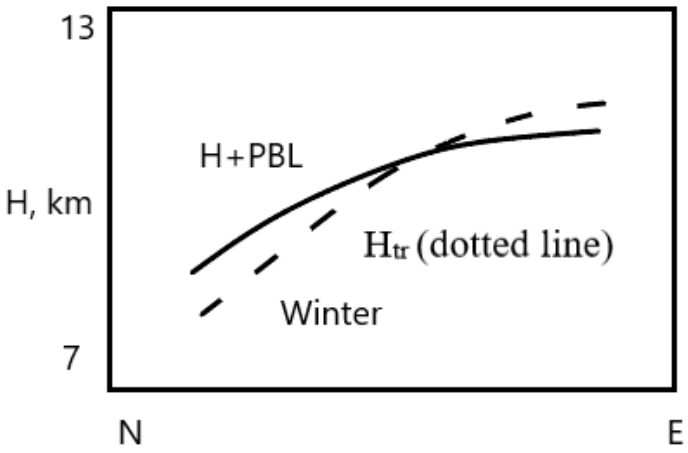


Рис.4. Высота тропопаузы.

Высота раздела потоков для статического состояния в неподвижной изотермической атмосфере (Кочин 2020) соответствует масштабу высоты в атмосфере H=RT/Mg. На этой высоте давление уменьшается в e (2,71) раз. В зависимости от приземной температуры масштаб высоты меняется от 7 до 9 км. Для динамического равновесия высота увеличится, как минимум, на толщину пограничного слоя атмосферы. В качестве иллюстрации на рис. 4 пунктирной линией показана высота тропопаузы зимой в северном полушарии (Гаврилова 1982) и масштаб высоты H просуммированный с толщиной пограничного слоя (PBL~ 1,5 km).

$$H = \frac{RT}{g} + \mathrm{H_{PBL}}(\sim 1{,}5\ km) \qquad (1)$$

Высота изменения вертикального градиента

Соотношение для высоты изменения вертикального градиента при использовании масштаба высоты и нормировки на 11000 метров при 288,2 градуса Кельвина выглядит следующим образом

$$H = 11000\frac{T_s}{288{,}2} \qquad (2)$$

Для учета зависимости температуры поверхности Ts °К от широты можно использовать следующее соотношение

$$T_s = T_e - T_d(1 - \cos\varphi) \qquad (3)$$

Где Те приземная температура воздуха на экваторе °К, Td разница приземных температур воздуха на экваторе и полюсе °К, φ географическая широта в градусах. При 288 °К на широте 45° и температуре экватора 300 °К разница Td равна 40 °К, а средняя температура вблизи полюсов около -10°С.

Температуры на высоте изменения вертикального градиента

В соответствии с определением МСА температура на высоте изменения вертикального градиента равна 216,8°К. Соответственно при изменении приземной температуры разница будет добавлена к этой температуре и температура стратосферы.
Учитывая (3) получаем для МСА

$$Ts = T_E - 0{,}0065 * 11000 \quad (4)$$

А для «усовершенствованной» МСА

$$T_s = T_e - 0{,}0065 \frac{11000 T_e}{288} \quad (5)$$

Разница температур

$$\Delta T = 0{,}0065 * 11000 \left(1 - \frac{T_E}{288}\right) \textit{(6)}$$

Стратосфера на полюсе примерно на 7 градусов теплее по сравнению с МСА.

Заключение

Международная стандартная атмосфера (МСА), которая моделирует гипотетический вертикальный профиль температуры в некий условный день при фиксированной приземной температуре 15°C, может быть усовершенствована путем введения переменной высоты изменения вертикального градиента температуры. Эту высоту можно привязать к приземной температуре воздуха по аналогии с масштабом высоты. В свою очередь приземную температуру воздуха можно аппроксимировать приближенным соотношением на базе температуры экватора и разницы температур экватора и полюса, что дает возможность учитывать сезонные изменения температуры.

ГОСТ 4401-81 Группа Т27

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

АТМОСФЕРА СТАНДАРТНАЯ МКС 07.040